Isolationsmessungen und Fehlerbestim... an ...

Isolationsmessungen und Fehlerbestimmungen

an

elektrischen Starkstromleitungen.

Von

F. Charles Raphael.

Autorisirte deutsche Bearbeitung

von

Dr. Richard Apt.

Mit 118 in den Text gedruckten Figuren.

Berlin. 1900. **München.**
Julius Springer. R. Oldenbourg.

Buchdruckerei von Gustav Schade (Otto Francke) in Berlin N.

Vorwort des Verfassers.

Während über die Bestimmung von Fehlern in Telegraphenkabeln bereits eine ebenso zahlreiche wie ausführliche Litteratur existirt, ermangelt es noch einer gleich umfassenden Darstellung der Methoden, die der Fehlerbestimmung in elektrischen Beleuchtungs- und Kraftübertragungsnetzen dienen. Abgesehen von einigen kurzen, in Fachzeitschriften publicirten Artikeln ist über den Gegenstand kaum etwas veröffentlicht worden. Nichtsdestoweniger erfordern beide Aufgaben eine durchaus verschiedene Behandlung. Fehlerstellen in Telegraphenkabeln werden in der Regel erst bestimmt, nachdem ihr Widerstand, mit dem des Kabels selbst verglichen, klein geworden ist, während in Starkstromkabeln fast immer das Umgekehrte der Fall ist. Diese Thatsache allein genügte schon, dass für die Fehlerbestimmung in Starkstromleitungen eigene Methoden ausgebildet werden mussten. Zweck und Ziel des vorliegenden Buches soll es sein, diese Methoden systematisch zu beschreiben und hierdurch nach Möglichkeit eine Lücke in der Fachlitteratur auszufüllen.

In Kapitel II und III werden die verschiedenen Methoden der Isolationsmessung während des Betriebes kritisch behandelt, da diese Messungen wohl in engstem Zusammenhange mit dem Hauptgegenstande des Buches stehen. Besonders hervorgehoben sei die in Kapitel II beschriebene Methode, den Isolationswiderstand eines Netzes zu messen, dessen einer Leiter ständig geerdet ist, da diese Methode meines Wissens bisher noch nicht angewandt worden ist.

Eingehende Berücksichtigung haben die Methoden über die automatische Anzeige von Fehlerstellen in Leitungsnetzen erfahren. Diese Methoden, die sich der Prüfdrähte in den Kabeln bedienen, um die Lage der Fehlerstelle der Centrale zu signalisiren, sollten in grössserem Umfange wie bisher zur Anwendung gelangen. Der von Dr. Kallmann vor dem Elektrotechnischen Verein zu Berlin im Jahre 1893 über diesen Gegenstand gehaltene Vortrag scheint insofern nicht ganz richtig aufgefasst worden zu sein, als man übersah, dass die Benutzung der Prüfdrähte zur Anzeige der Fehlerstellen ihre ursprüngliche Aufgabe, die Messung der Spannung an den Speisepunkten, in keiner Weise beeinträchtigt.

Neu sind meines Wissens die Untersuchungen, die sich auf die Ermittelung der Empfindlichkeit bei Fehlerbestimmungen beziehen, wie sie mit einer gegebenen instrumentellen Anordnung zu erreichen ist. Die Endformel kann nützlich sein, wenn es sich um die Auswahl eines geeigneten Instrumentariums handelt, oder wenn man die Empfindlichkeit eines solchen für Fehlerbestimmungen berechnen will. Bei der Ableitung dieser Formel aus den Grundgleichungen der Wheatstone'schen Brücke habe ich mich derselben Methode bedient, die Kempe in seinem „Handbuch der elektrischen Messungen" benutzt hat, um die Empfindlichkeitsgrenze bei Widerstandsmessungen zu finden. Die besonderen Bedingungen des Problems haben indessen in dem Falle der Fehlerbestimmung nach der Schleifenmethode unter der Annahme eines niedrigen Widerstandes der Schleife zu einer weit bequemeren Endformel geführt.

F. Charles Raphael.

Vorwort zur deutschen Ausgabe.

Die grosse Zahl bestehender Centralanlagen und die fortdauernde Errichtung neuer bringt es mit sich, dass der Elektro-Ingenieur mehr als früher sich mit jenen Zweigen der Messtechnik befassen muss, die der Prüfung und Instandhaltung des Kabelnetzes, jenes wichtigsten und werthvollsten Theiles einer elektrischen Anlage, dienen. Diesem Bedürfniss hat die deutsche technische Litteratur bisher nicht in dem Maasse Rechnung getragen, als dass eine allen Anforderungen nach Möglichkeit entsprechende Monographie über diesen Gegenstand, die auch die neueren Arbeiten berücksichtigt, überflüssig erschiene. Ich habe es daher auf Anregung befreundeter Fachgenossen unternommen, das Raphael'sche Buch, das eine umfangreiche und zweckentsprechende Zusammenstellung des bisher vorliegenden Materials auf dem Gebiete der Kabelmesstechnik bietet, durch eine unseren technischen Verhältnissen angepasste Bearbeitung dem deutschen Publikum zugänglich zu machen.

Gegenüber der englischen Ausgabe bietet die vorliegende deutsche Bearbeitung in mehrfacher Hinsicht Abänderungen. Kapitel I, das die Grundzüge der Kabelmesstechnik behandelt, ist völlig neu bearbeitet worden, insbesondere hat die Methode des direkten Ausschlags eine eingehendere Darstellung erhalten. Auch die Beschreibung der Thomson'schen Doppelbrücke ist eingefügt worden. An Stelle der englischen Instrumente sind fast durchgehends die Fabrikate deutscher Firmen aufgenommen. Schliesslich haben auch neuere, nach Erscheinen des englischen

Werkes veröffentlichte Arbeiten Berücksichtigung gefunden. Die Zusammenstellung der Rechnungen und mathematischen Ableitungen in ein besonderes Schlusskapitel habe ich nicht beibehalten. Ich glaubte dem Geschmack des deutschen Ingenieurs mehr zu entsprechen, wenn ich der Formel auch zugleich ihre mathematische Vorgeschichte beigab.

Endlich sind eine Reihe kleinerer, aber nicht unwichtiger Einzelheiten hinzugefügt worden, die meiner eigenen Praxis entstammen.

Köln a. Rh., April 1900.

Dr. Richard Apt.

Inhaltsverzeichniss.

Drittes Kapitel.

Isolationsmessungen an Hochspannungsnetzen während des Betriebs.

Viertes Kapitel.

Allgemeine Methoden der Fehlerbestimmung.

Fünftes Kapitel.

Fehlerbestimmungen während des Betriebs.

Sechstes Kapitel.

Automatische Fehlermeldeapparate.

———

Erstes Kapitel.

Die Grundzüge der Kabelmesstechnik.

1. Dreierlei Arten von Fehlern in Leitungen und Kabelnetzen lassen sich gemeinhin unterscheiden:

1. Bruch des Leiters,
2. Kurzschluss zwischen zwei Leitern,
3. Kontakt zwischen Leiter und Erde.

Fehler der erstgenannten Art sind in elektrischen Starkstromleitungen wegen des grossen Querschnittes der Leiter selten. Falls wirklich einmal ein Bruch stattfindet, so kann die Lage der Fehlerstelle leicht dadurch bestimmt werden, dass man feststellt, an welcher Stelle des Leitungskreises die Stromabgabe aufhört. In höherem Grade der Gefahr des Bruches ausgesetzt sind allerdings die sogenannten Prüfdrähte, welche jedem Leiter behufs Kontrole der Spannung an den Verbrauchsstellen beigegeben werden. Dieselben bestehen in der Regel aus isolirten Drähten von 1—1,5 qmm Querschnitt und werden mit dem Leiter verseilt. In welcher Weise sich die Lage der Bruchstellen in diesen Fällen leicht bestimmen lässt, soll später kurz erläutert werden.

Die Lage von Kurzschlüssen zwischen zwei oder mehr Leitern — ein Fehler, der insbesondere bei Drehstromkabeln für hohe Spannung leicht auftreten kann — lässt sich nach den in Kapitel IV gegebenen Methoden bestimmen, wenn man über die Lage des Kurzschlusses aus dem Durchbrennen der zu dem betreffenden Distrikt gehörenden Bleisicherungen nicht genau genug orientirt ist.

Weitaus am häufigsten sind Fehler in Folge Erdschluss, und wenn das Wort „Fehler“ ohne nähere Angabe gebraucht wird, so ist immer diese Art von Fehlern gemeint. Erdschlüsse können sehr verschiedenen Ursachen ihre Entstehung verdanken. Die Isolation

eines Kabels kann schadhaft sein. Oft ist auch eine Muffe oder ein Kabelkasten nicht wasserdicht. Bei blanken unterirdischen Leitungen kann ein Isolator schmutzig werden oder zerbrechen, oder es kann Wasser in den Kanal eindringen. Endlich kann die Fehlerstelle auch in einem Hausanschluss liegen.

Fabrikationsfehler an den Kabeln werden wohl in den meisten Fällen bereits innerhalb der Fabrik entdeckt und ausgebessert. Jedes Kabel hat, bevor es die Fabrik verlässt, eine überaus sorgfältige und mit den genauesten Instrumenten vorgenommene Prüfung durchzumachen und wird nur dann als gut ausgegeben, wenn es gewisse Mindestanforderungen befriedigt.

Während der Verlegung kann die Isolation des Kabels durch Stösse oder Quetschungen eine Beschädigung erfahren und dadurch der Feuchtigkeit Zutritt zur Kabelseele verschaffen. Reines Wasser ist allerdings an und für sich bei nicht zu grosser Berührungsfläche ein sehr schlechter Leiter, dagegen leiten schmutziges Wasser, nasses Holz, feuchte Baumwolle, feuchte Steine — überhaupt alle feuchten Materialien — gut. Die Isolirschicht der Kabel besteht nun in der Regel aus imprägnirtem Faserstoff (Jute), Papier u. a., die durch einen Bleimantel geschützt sind. Die Faserstoffe sind in trockenem Zustande zwar ausgezeichnete Isolatoren, jedoch sind sie nicht wasserdicht, sondern im Gegentheil höchst hygroskopisch. Das kleinste Loch im Bleimantel genügt daher schon, um in Folge des allmählichen Vordringens der Feuchtigkeit in den Faserstoff zu einem erheblichen Fehler Veranlassung zu geben. Bei einem Kabel der bezeichneten Art ist es ferner ausserordentlich wichtig, dass die einzelnen Löthstellen, sowie die Kabelmuffen einen völlig dichten Abschluss haben. Wenn insbesondere das Löthmetall porös ist, dringt nach dem ersten Regen Wasser in die Löthstelle ein. Es sei hier bemerkt, dass das Loth für Lotharbeiten an Bleimänteln mindestens einen Gewichtstheil Zinn auf zwei Gewichtstheile Blei enthalten muss. Ein Loth mit höherem Bleigehalt lässt sich zwar leichter und glatter verarbeiten, indessen durchsetzt sich die Löthstelle trotz ihres scheinbar schöneren Aussehens nach dem Erstarren des Lothes mit Poren. Für Löthkolbenarbeiten gebraucht man ein Loth aus gleichen Gewichtstheilen Blei und Zinn.

Auch die aus imprägnirten Stoffen bestehende Umhüllung von vulkanisirten Gummikabeln ist hygroskopisch und wird in nassem und feuchtem Zustande leitend. Sind die Kabel in Rohren verlegt,

so ist es daher möglich, dass bei einer mechanischen Verletzung des Kabels der Fehler gar nicht an der ursprünglich schadhaft gewordenen Stelle zum Ausbruch kommt, sondern sich an der nächstgelegenen Stelle ausbildet, wo die Umhüllung in gutem Kontakt mit dem Rohre steht. In gleicher Weise kann auch bei direkt in die Erde verlegten armirten Bleikabeln ein Loch im Bleimantel zur Entstehung eines Erdschlusses an einem anderen Punkte Veranlassung geben, wo der Kontakt zwischen Bleimantel und Erde besser ist.

Kabelmuffen für Gummikabel müssen ebenfalls wasserdicht sein. Gummi zieht zwar keine Feuchtigkeit an, wie Jute und Papier, wenn indessen die Kabelenden nass werden, so bildet sich auf dem Gummi eine leitende Oberflächenschicht von der Seele bis zur Muffe, so dass, da letztere mit der Erde in Kontakt ist, Erdschluss entsteht.

Eine weitere beachtenswerthe Quelle für die Entstehung von Fehlern liegt in den vielfachen Biegungen, denen besonders die Kabelenden beim Verlöthen zweier Stücke ausgesetzt sind. Erdschlüsse in Hausinstallationen kommen seltener vor, als man auf den ersten Anschein erwarten sollte. Diese Thatsache lässt jedoch keineswegs einen Rückschluss zu auf gute Arbeit und Installationsmaterialien, sondern ist weit mehr der Abwesenheit von nassen und feuchten Oberflächen in Rechnung zu stellen, in Folge dessen schadhaft gewordene Leiter keinen Kontakt mit der Erde erhalten können.

Eine grosse Zahl von Fehlern rührt von mechanischen Verletzungen der Kabel durch Pickenhiebe her, wenn der Erdboden zum Zwecke der Verlegung anderer elektrischer Leitungen oder Gas- und Wasserröhren aufgegraben wird. Derartige Fehler wären unbedenklich, wenn sie sofort zu Tage träten; aber selten wird ein Kabel so stark beschädigt, dass der Leiter in direkten Kontakt mit der Erde oder dem Bleimantel und der Eisenarmatur kommt. In der Regel macht sich, wenn in dem Bleimantel oder in der Isolationsschicht ein Loch entstanden ist, der Fehler erst nach Tagen, Wochen, Monaten oder gar Jahren bemerkbar, je nach den besonderen Umständen, die von der Feuchtigkeit des Erdreiches wie von der Lage des Loches und von der Art des Kabels abhängen. Zur schnelleren Auffindung solcher Fehler dienen insbesondere die automatischen Kontrolapparate, die im VI. Kapitel beschrieben sind.

Fehler auf oberirdischen Leitungen kann man, nachdem zunächst eine ungefähre Ortsbestimmung gemacht ist, leicht durch Abgehen der Leitung auffinden.

2. Im Folgenden sollen zunächst einige Definitionen und Erläuterungen von technischen Ausdrücken gegeben werden, die in diesem Buch angewandt sind.

Kabelnetz, Beleuchtungsnetz, Netz. Darunter versteht man das gesammte Leitersystem zwischen der Centrale und den Verbrauchsapparaten. In grösseren Anlagen ist das Netz getheilt in Vertheilungsleitungen und Speiseleitungen (feeders). Von den Vertheilungsleitungen zweigen sich die Hausanschlüsse ab. Den Vertheilungsleitungen wird der Strom von der Centrale aus durch die Speiseleitungen in gewissen Punkten, den Speisepunkten, zugeführt. Es ist nicht üblich, Verbrauchsapparate direkt an die Speiseleitungen anzuschliessen. Bei Hochspannungsanlagen werden auch die Hochspannungsleitungen von der Centrale zu den Transformatoren oft feeders genannt. Indessen sind umfangreiche Hochspannungsnetze in der Regel so angeordnet, dass die Transformatoren an Hochspannungsvertheilungsleitungen angeschlossen sind, denen dann der Strom durch Speiseleitungen zugeführt wird.

Isolationswiderstand ist der Widerstand zwischen dem Leitersystem und der Erde. Er wird stets in Ohm oder Megohm ausgedrückt, und zwar ist 1 Megohm $= 10^6$ Ohm. In England und Amerika ist es üblich, Ohm durch ω, Megohm durch Ω anzudeuten. Um Verwechselungen zu vermeiden, sollen jedoch im Folgenden die Worte Ohm und Megohm stets voll ausgeschriehen werden.

Fehlerwiderstand. Mit diesem Ausdruck soll die Grösse bezeichnet werden, die man oft auch ungenauerweise Isolationswiderstand einer einzelnen Leitung nennt. Es ist der Isolationswiderstand, den die in Frage stehende Leitung haben würde, wenn sie nicht durch die Verbrauchsapparate mit anderen Leitungen verbunden wäre. So seien z. B. in einem Dreileitersystem die Fehlerwiderstände der einzelnen Leitungen f_1, f_2, f_3, dann bilden diese 3 Widerstände in Parallelschaltung den Isolationswiderstand des Netzes. Bezeichnen wir diesen mit F, so ist

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3}$$

d. h. die Leitungsfähigkeit zwischen dem ganzen Netz und Erde ist gleich der Summe der Fehlerleitungen zwischen jedem Leiter und Erde. Den Isolationswiderstand eines Netzes erhält man, wenn man den Widerstand zwischen irgend einem Punkte eines Leiters in dem

geschlossenen Leitungsnetze und Erde misst, und man kommt stets zu demselben Ergebniss, von welchem Punkte und von welchem Leiter des Netzes man auch ausgeht. Diese Unterscheidung zwischen Isolationswiderstand und Fehlerwiderstand hat sich als recht zweckmässig erwiesen, besonders bei der Betrachtung von Isolationsmessungen und Fehlerbestimmungen während des Betriebes ist die Trennung beider Begriffe nützlich und schützt vor mannigfachen Verwechselungen.

Sammelschienen (Omnibus oder 'bus Bars) sind die Leiterschienen am Schaltbrett, von denen die Speiseleitungen ausgehen. In Wirklichkeit sind es also die Verbindungsschienen zwischen Netz und Dynamo.

Instrumente mit direkter Ablesung (Direct-reading Instruments) sind solche Instrumente, bei denen die Ablesung sofort ohne jede Umrechnung den Werth des Stromes, der Spannung etc. in Ampère, Volt etc. angiebt. So ist eine Wheatstone-Brücke mit direkter Ablesung eine solche, an der die Grösse des zu messenden Widerstandes ohne Weiteres an dem Instrument abzulesen ist, wenn sich die Brücke im Gleichgewicht befindet. Eine Fehlerbestimmungsbrücke mit direkter Ablesung giebt durch die Einstellung des Zeigers auf der Skala in der Gleichgewichtslage die Entfernung der Fehlerstelle von der Centralstation direkt in Metern an.

Ist ein Instrument als „mit direkter Ablesung“ bezeichnet, so ist damit noch nicht gesagt, dass sich der Zeiger direkt, ohne hin und her zu schwingen, beim Einschalten des Instruments auf den richtigen Werth einstellt. Instrumente, bei denen dies der Fall ist, heissen aperiodisch (dead-beat). Zweckmässig vereinigt ein Instrument beide Eigenschaften in sich.

3. In Fig. 1 sind r, q, x, y Widerstände, G ein Galvanometer und B eine Batterie oder ein Gleichstromgenerator. Eine derartige Kombination von Widerständen ist bekannt unter dem Namen der Wheatstone'schen Brücke.

Wenn das Galvanometer stromlos ist, so gilt die Gleichung:

$$\frac{r}{q} = \frac{x}{y} \qquad \text{. . . . . (1)}$$

wo unter r, q, x, y die elektrischen Widerstände der Drähte verstanden sind. Diese Gleichung gilt unabhängig von den Widerständen der Batterie und des Galvanometers und ihrer Zuleitungs-

und Verbindungsdrähte. Das Bestehen von Gleichung (1) ist die Bedingung für das sogenannte Gleichgewicht der Brücke.

Die Ableitung von Gleichung (1) ergiebt sich leicht aus der Anwendung des Ohm'schen Gesetzes auf die einzelnen Theile des Stromkreises. Bezeichnet man mit J_1 die Stromstärke in dem Kreise *B A C E B*, mit J_2 die in dem Kreise *B A D E B*, in dem Falle, wo das Galvanometer stromlos ist, und seien die Potentiale an den

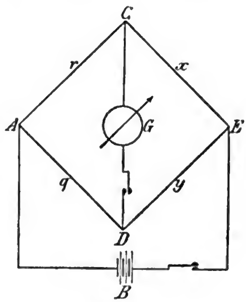


Fig. 1.

4 Eckpunkten des Brückenschemas durch die diesen Punkten entsprechenden Buchstaben ausgedrückt, so gelten unter Berücksichtigung der Gleichheit von *C* und *D* bei Brückengleichgewicht die 4 Gleichungen

$$J_1 = \frac{A - C}{r} = \frac{A - D}{r}; \quad A - D = J_1 \cdot r,$$

$$J_1 = \frac{C - E}{x} = \frac{D - E}{x}; \quad D - E = J_1 \cdot x,$$

$$J_2 = \frac{A - D}{q} \quad ; \quad A - D = J_2 \cdot q,$$

$$J_2 = \frac{D - E}{y} \quad ; \quad D - E = J_2 \cdot y.$$

Durch Gleichsetzen der rechten Seiten je zweier dieser Gleichungen folgt

$$J_1\, r = J_2\, q,$$

$$J_2\, x = J_2\, y$$

und endlich durch Division dieser Gleichungen

$$\frac{r}{x} = \frac{q}{y} \quad \text{oder:}$$

$$\frac{r}{q} = \frac{x}{y} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Ist das Verhältniss $\frac{r}{q}$ bekannt und wählt man für y einen veränderlichen Rheostatenwiderstand, so kann man x bestimmen, indem man y so lange verändert, bis das Galvanometer stromlos wird. Dann ist Gleichung (1) erfüllt und man erhält den Werth des unbekannten Widerstandes:

$$x = \frac{r}{q} y \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Man kann auch für y einen unveränderlichen Widerstand von bekannter Grösse einsetzen und zwischen C und D einen gestreckten Draht von gleichförmigem Querschnitt ausspannen, auf dem A als Schleifkontakt verschiebbar ist. Das Verhältniss der Widerstände r und q ist dann verschieden je nach der Lage des Schleifkontaktes, und man stellt diesen so ein, dass das Galvanometer stromlos wird. Dann ist x wieder aus Gleichung (2) zu berechnen, in der nunmehr $\frac{r}{q}$ die variable Grösse ist. Zweckmässig ist es, obwohl nicht absolut nöthig, auch bei Anwendung eines Schleifdrahtes den Widerstand y veränderlich zu gestalten. r, q, x, y heissen die vier Zweige der Brücke. Batterie- und Galvanometerkreis werden die Diagonalzweige genannt. Batteriezweig und Galvanometerzweig sind mit einander vertauschbar, so dass also auch die Batterie zwischen die Punkte $C D$ und das Galvanometer zwischen die Punkte $A E$ gelegt werden kann[1]). Die Empfindlichkeit der Brückenanordnung ist ausserdem abhängig von der Grösse der Zweigwiderstände, sowie von ihrem Verhältniss zum Galvanometerwiderstand. Im Allgemeinen ist sie am grössten, wenn die Widerstände der vier Brückenzweige nahezu gleich sind. Die Anwendbarkeit dieser allgemeinen Grundsätze für die empfindlichste Anordnung der Brücke ist indessen,

[1]) Eine Regel für die Wahl der empfindlicheren Anordnung lässt sich so formuliren: Je nachdem Batterie oder Galvanometer einen grösseren Widerstand besitzen, ist diese oder jenes zwischen die Punkte zu legen, an denen die grössten und kleinsten Brückenwiderstände zusammenstossen.

besonders bei Fehlerbestimmungen, durch Rücksichtnahme auf gewisse Bedingungen der Praxis sehr beschränkt. Bei der Ausführung der Messung wird ein Stromschlüssel sowohl in den Batteriezweig, wie in den Galvanometerzweig gelegt. Gewöhnlich wird der Batteriekreis zuerst geschlossen, damit der Strom einen konstanten Werth angenommen hat, bevor er das Galvanometer durchfliesst. Besonders dann ist diese Maassregel zu beachten, wenn die Widerstände Selbstinduktion enthalten, oder wenn sich in den Brückenzweigen Kapacitäten befinden.

4. Das Princip der Wheatstone'schen Brücke lässt sich verallgemeinern. Gleichung (1) gilt, wenn bei geschlossenem Batteriestrom die Galvanometerablenkung Null geworden ist. Nun

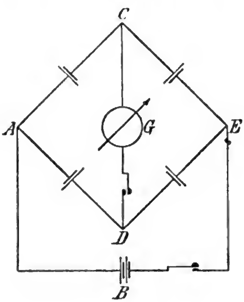


Fig. 2.

mögen jedoch nicht nur im Batteriekreis, sondern auch in den vier Zweigen der Brücke irgend welche elektromotorischen Kräfte herrschen (Fig. 2). Dann wird, auch wenn die Widerstände der vier Zweige sich gemäss Gleichung (1) verhalten, doch eine dauernde Ablenkung des Galvanometers vorhanden sein, anstatt dass es, wie im ersten Falle, in seiner Nullstellung bleibt. Diese auch bei offenem Batteriestromkreis eintretende Ablenkung heisst der „falsche Nullpunkt".

Wenn nun bei geschlossenem Batteriezweig das Galvanometer in derselben Lage zur Ruhe kommt, in der es sich bei geöffnetem Batteriezweig befand, also in dem falschen Nullpunkt, nicht in dem wirklichen Nullpunkt, d. h. wenn sich durch Oeffnen und Schliessen

des Batteriekreises die Stromstärke im Galvanometerkreis nicht ändert, so ist wiederum Gleichung (1) erfüllt. Daher lässt sich das allgemeine Gesetz für eine der Fig. 2 entsprechende Wheatstone'-sche Brücke folgendermassen aussprechen: Wenn die Galvanometerablenkung dieselbe bleibt, gleichgiltig ob der Stromkreis in dem einen Diagonalarm geöffnet oder geschlossen ist, so gilt Gleichung (1).

Die Richtigkeit dieses Gesetzes ist durch einfache Ueberlegungen zu erweisen: Die in den Brückenzweigen herrschenden elektromotorischen Kräfte erzeugen Ströme, welche diese Zweige sowohl wie den Galvanometerzweig durchfliessen. Schliesst man nun den Batteriezweig, so wird die Batterie in den Brückenzweigen in der gleichen Weise Ströme hervorbringen wie ohne das Vorhandensein der anderen elektromotorischen Kräfte, vorausgesetzt, dass die Widerstandsverhältnisse die gleichen bleiben, und die von beiden Quellen herrührenden Ströme werden sich übereinander lagern. Wenn indessen die Widerstände gemäss der Beziehung $\frac{r}{q} = \frac{x}{y}$ abgeglichen sind, so schickt die Batterie keinen Strom durch den Galvanometerzweig. Schliesst man daher den Batteriezweig, so bleibt die schon vorher im Galvanometerkreis herrschende Stromstärke unbeeinflusst.

Es ist nun noch das Umgekehrte zu beweisen, nämlich dass Gleichung (1) gilt, wenn das Galvanometer bei Schluss des Batteriezweiges auf dem falschen Nullpunkt verharrt. Aus den früheren Betrachtungen folgt, dass, wenn diese Gleichung nicht befriedigt wird, die Batterie einen Strom durch das Galvanometer sendet. Dieser lagert sich über die von den anderen E. M. K.'s herrührenden Ströme, und der resultirende Strom wird die Galvanometerablenkung ändern. Eine Aenderung kann nur dann nicht stattfinden, wenn die Batterie keinen Strom in den Galvanometerzweig sendet, d. h. wenn $\frac{r}{q} = \frac{x}{y}$ ist.

Bei Widerstandsmessungen und Fehlerbestimmungen unter gewöhnlichen Umständen ist das Schema der Wheatstone'schen Brücke das in Fig. 1 angedeutete, und der Batteriekreis wird vor dem Galvanometerkreis geschlossen. Bei Messungen während des Betriebes herrscht indessen häufig eine E.M.K. in zweien von den vier Armen der Brücke, und dann muss der Galvanometerkreis vor dem Batteriekreis geschlossen werden. In diesem Falle stellt man also auf den falschen Nullpunkt ein.

5. Kehren wir jetzt zu der durch Fig. 1 gegebenen Anordnung zurück. Wir ersetzen die Widerstände x und y durch ein Kabel der Länge L, das bei E einen Fehler (Erdschluss) hat (Fig. 3), und legen den einen Batteriepol an Erde, anstatt ihn direkt mit der Brücke zu verbinden.

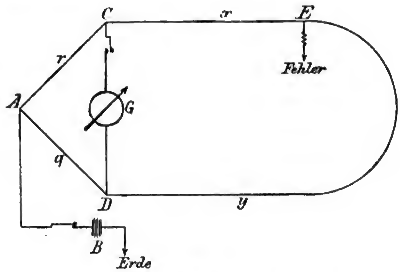


Fig. 3.

Ein Vergleich der Figuren 1 und 3 zeigt, dass in beiden Fällen dieselben Verhältnisse obwalten, abgesehen von der unwesentlichen Aenderung, dass jetzt in dem Batteriezweig zu dem inneren Widerstand der Batterie der Fehlerwiderstand hinzukommt. In der Gleichgewichtslage der Brücke ist, wie früher,

$$\frac{r}{q} = \frac{x}{y} \quad \text{. . . . .} \quad (1)$$

Aus dieser Gleichung folgt unmittelbar die weitere:

$$\frac{r}{r+q} = \frac{x}{x+y}.$$

Setzt man nun

$$s = r + q, \qquad l = x + y,$$

so wird

$$\frac{r}{s} = \frac{x}{l}$$

und schliesslich

$$x = \frac{r}{s}\, l. \quad \text{. . . . .} \quad (3)$$

Da der Widerstand des Kabels proportional seiner Länge ist, so können wir, wenn wir unter X den Abstand des Fehlers von

dem einen Ende des Kabels verstehen und mit L die Kabellänge bezeichnen, schreiben

$$X = \frac{r}{s} L \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Damit ist der Ort des Fehlers, d. h. sein Abstand vom Punkte C festgelegt, wenn die Länge des Kabels in m. bekannt ist. Die Widerstände r, q können entweder in einem Widerstandskasten enthalten sein, oder sie können einen geraden, über einer Skala ausgespannten Draht bilden; in diesem Falle ist A ein Schleifkontakt. Da nur das Verhältniss $\frac{r}{s}$ in Gleichung (4) vorkommt, so kann man dann für r und s die entsprechenden Längen des Schleifdrahtes einsetzen,

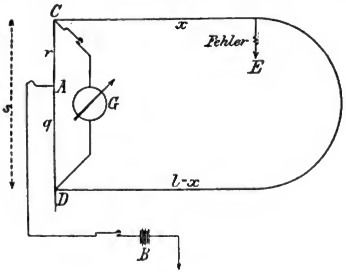


Fig. 4.

gemessen in irgend einer beliebigen Längeneinheit, ganz unabhängig von dem Maasse, in dem l gegeben ist. Diese Methode der Fehlerbestimmung ist die Schleifenmethode von Murray. Sie ist die einfachste und beste in allen den Fällen, wo ihre Anwendung möglich ist.

Bei der Benutzung eines Schleifdrahtes kann man auch zwei Schleifkontakte verwenden. A und D (Fig. 4) seien die Schleifkontakte, in C ist das Kabel an den Schleifdraht angeschlossen genau im Nullpunkt der Skala. Nun stellen wir D in einem solchen Abstande von C fest, dass die Zahl der Skalentheile zwischen C und D gerade die Länge des Kabels in irgend einer Einheit angiebt. Dann ist durch die Lage von A bei Gleichgewicht der Brücke direkt der Abstand der Fehlerstelle von dem Ende C in derselben Einheit ge-

geben. Denn in Gleichung (4) ist $s = L$ (abgesehen von einem die Verschiedenheit der Einheiten ausdrückenden Zahlenfaktor), also:

$$X = r.$$

Auf diese Weise, durch Anbringung zweier Schleifkontakte, kann also die Brücke zu einem Instrument für direkte Anzeige von Fehlerorten gemacht werden.

6. Fig. 5 zeigt eine Ausführung des Schleifdrahtes, wie sie für Widerstandsmessungen und Fehlerbestimmungen ganz zweckmässig ist. Um dem Draht, ohne dabei an Handlichkeit des Instruments einzubüssen, eine möglichst grosse Länge geben zu können, ist derselbe zickzackförmig ausgespannt und besitzt einen Schleifkontakt,



Fig. 5.

dessen kontaktgebender Theil behufs Einstellung auf die verschiedenen Abtheilungen des Drahtes in einer Führung parallel mit sich selbst verschoben werden kann[1]). Will man nach der Schleifenmethode Fehler bestimmen, so verbindet man die beiden Enden des fehlerhaften Kabels direkt mit den Endpunkten des Schleifdrahtes; an dieselben Punkte werden auch die Galvanometerleitungen angelegt. Im Galvanometerkreis ist ein Stromschlüssel unbedingtes Erforderniss. Ein Pol der Batterie liegt an Erde, der andere Pol ist mit dem Schleifkontakt verbunden. Die Hauptnachtheile der angegebenen Konstruktion sind erstens die infolge der Montirung auf Holz nur geringe Isolation des Drahtes und zweitens die leicht eintretende Möglichkeit einer Beschädigung desselben durch Funken beim Kontakt Eine nach Angabe des Verfassers verbesserte Form

[1]) Die bei gewöhnlichen Widerstandsmessungen auszuführenden Verbindungen sind nach Fig. 1 ohne Weiteres ersichtlich.

der Schleifdrahtbrücke speciell für Fehlerbestimmungen ist in den Fig. 6, 7 und 8 dargestellt.

Der Anordnung zu Grunde gelegt ist das Schema der Fig. 4. Der Brückendraht erhält zwei Schleifkontakte, wodurch, wie in § 5 gezeigt, die Brücke zu einem Instrument für direkte Anzeige von Fehlerorten gemacht werden kann. Fig. 6 zeigt eine Ansicht der gesammten Anordnung des Schleifdrahtes und der Zubehörtheile. Die Pole *C* und *M* sind so eingerichtet, dass die Kabelenden ohne Benutzung von Zuleitungsdrähten direkt eingeklemmt werden können. Fig. 7 giebt

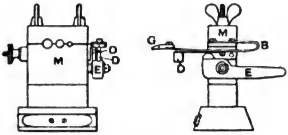


Fig. 7.

eine detaillirte Skizze des Gleitkontakts *M*. Die Metallfeder *B* verbindet den Pol mit dem Messdraht. Der Ebonithebel *E* dient zum Heben der Feder beim Bewegen des Kontaktes, um ein Abschleifen des Brückendrahtes zu verhindern.

Eine vierkantige, um ihre Längsachse drehbare Schiene trägt auf jeder Seite eine Skala, von denen je nach Bedarf die eine oder die andere benutzt wird. Die eine Seite der einen Meter langen Schiene ist von 0—1000 getheilt, die zweite von 0—500, die dritte von 0—250 und die vierte von 0—1250. Je nach der Länge des Kabels wird die eine

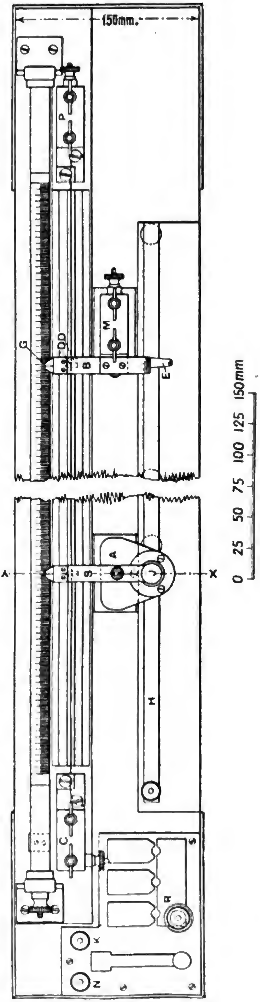


Fig. 6.

oder die andere Skala benutzt. Der Gleitkontakt *A* ist in Fig. 8 abgebildet und so eingerichtet, dass beim Niederdrücken des Knopfes *J* zuerst der Messdraht, und dann erst die mit der Batterie verbundene Schiene *H* eingeschaltet wird; die Unterbrechung des Kontaktes erfolgt in umgekehrter Reihenfolge, wodurch ein Auftreten von Funken am Messdraht in zweckmässiger Weise vermieden wird.

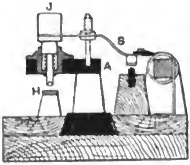


Fig. 8.

Das Instrument ist auf einem Mahagonibrett montirt und zum Gebrauch in Centralstationen bestimmt, kann aber auch transportabel eingerichtet werden.

Um direkt, ohne Rechnung, den Ort des Kabelfehlers zu erhalten, stellt man zunächst den Schleifkontakt *M* auf denjenigen Skalentheil ein, der abgesehen von der Längeneinheit, die Länge des zu prüfenden Kabels angiebt. Hierzu wird diejenige Skala benutzt, auf der man die grösste Messdrahtlänge erhält. Einen Pol der Batterie verbindet man mit der Stange *H* (Fig. 6) und leitet den anderen zur Erde ab. Das Galvanometer wird zwischen *N* und *M* eingeschaltet.

Die Einstellung des Gleitkontaktes *A* giebt auf der Skala direkt die Entfernung des Isolationsfehlers von der Station in m an, wenn die Länge des Kabels in m gegeben war. Zur Verwendung für gewöhnliche Widerstandsmessungen ist die Brücke noch mit drei Widerstandsrollen versehen, die mittels Stöpsel aus- resp. eingeschaltet werden können.

In vielen Fällen dürfte übrigens eine wesentlich einfachere Anordnung des Schleifdrahtes ohne apparativ-konstruktiven Aufwand zu einem gleich guten Resultate führen. Man spannt zwischen den Kabelenden durch aufgesetzte Klemmschrauben oder durch einfaches straffes Umwinden einen 3—4 m langen, möglichst kalibrischen Stahldraht aus und benutzt die eine Batterieleitung direkt als Schleif-

kontakt, indem man das blanke Ende zu einem Haken biegt. Die Gleichgewichtslage des Schleifkontaktes wird dann durch ein angelegtes Bandmaass abgelesen. Besonders bei Kabeln mit starken Querschnitten, deren Enden sich sehr schwer in eine gewünschte Lage bringen lassen, dürfte diese einfache Vorrichtung der Benutzung eines montirten Schleifdrahtes vorzuziehen sein, zumal man in der zu wählenden Länge des Drahtes durch nichts beschränkt ist.

7. Aus der grossen Anzahl der verschiedensten Zusammenstellungen von Widerstandssätzen zum Gebrauch als Wheatstone'sche Brücke sollen hier nur zwei herausgegriffen werden. Eine sehr

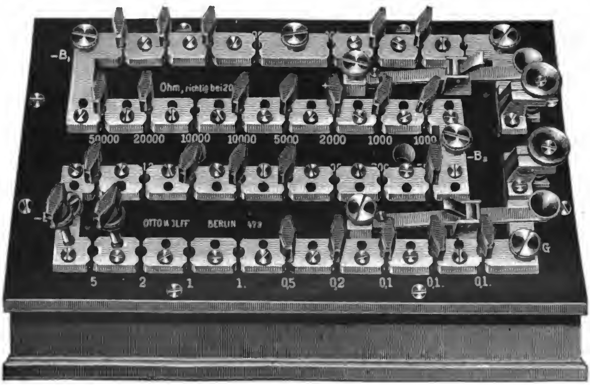


Fig. 9.

zweckmässige und handliche Form besitzt die Messbrücke von Wolff (Berlin). Fig. 9 und 10 zeigen eine Gesammtansicht und eine schematische Darstellung der Schaltung derselben.

In Fig. 10 sind die entsprechenden Bezeichnungen wie in Fig. 1, dem Grundschema der Brücken, wieder gewählt. Gegenüber der in Fig. 1 dargestellten Anordnung sind hier Brücken- und Galvanometerzweig vertauscht. Die Batterie wird an die Punkte C, D, das Galvanometer an die Punkte A, E gelegt, während der zu messende Widerstand zwischen die mit E und C verbundenen Klemmen X, X' eingeschaltet wird. Zwischen D, E liegt der Vergleichswiderstand,

der eine Gesammtgrösse von 100 000 Ohm hat und sich bis auf 0,1 Ohm reguliren lässt. Bei C befindet sich ein Stromschlüssel für die Batterie, bei E ein solcher für das Galvanometer, beide sowohl für kurzen wie für dauernden Schluss eingerichtet. Durch geeignete Wahl des Verhältnisses $\frac{r}{q}$ ist es möglich, mit der Brücke Widerstände von 0,001 Ohm bis 10 Millionen Ohm zu messen. Hat man z. B. einen Widerstand zu bestimmen, der der Grössenordnung nach etwa 1 Million Ohm ist, und man wählt $\frac{r}{q} = 100$, so würde

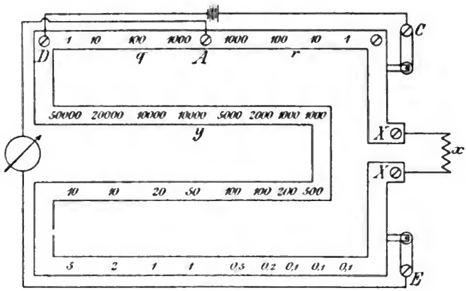


Fig. 10.

der Vergleichswiderstand 10 000 Ohm einen Widerstand X von 1 Million Ohm kompensiren.

Will man die Brücke zur Fehlerbestimmung nach der Schleifenmethode benutzen, so wird einer der Widerstände r, q, etwa r, durch Einstecken aller Stöpsel ausgeschaltet, so dass die Punkte A und C in direkter Verbindung mit einander stehen. Dann wird die Batterie, deren einer Pol geerdet ist, an D, das Galvanometer an A und E und die Kabelschleife an X, X, die identisch sind mit E und C resp. A, angelegt. Ist die Grösse des bei Brückengleichgewicht in DE eingestellten Widerstands R, so ist, wenn L die Gesammtlänge des Kabels ist, die Entfernung der Fehlerstelle vom Anfang a des Kabels gegeben durch den Ausdruck

$$X = \frac{L \cdot q}{R + q} \cdot$$

8. Wenn das Galvanometer einigermaassen empfindlich ist, kann es vorkommen, dass man mit Hülfe des Vergleichswiderstandes der Brücke das genaue Gleichgewicht nicht erreicht. Beispielsweise mag bei einem Vergleichswiderstande von 113 Ohm ein Ausschlag von 12 Skalentheilen nach der Richtung erfolgen, die anzeigt, dass ein grösserer Widerstand einzuschalten ist, bei 114 Ohm eine Ablenkung von 19 Skalentheilen nach der entgegengesetzten Richtung. Dann ist der genaue Werth des zum Gleichgewicht der Brücke benöthigten Widerstandes

$$113 + \frac{12}{12 + 19} = 113 + \frac{12}{31} = 113{,}4 \text{ Ohm}.$$

Ist allgemein x_0 der gesuchte Widerstand, x_1 resp. x_2 der ihm zunächst liegende, in der Brücke eingeschaltete kleinere resp. grössre und sind α_1 resp. α_2 die ihnen entsprechenden Galvanometerausschläge, so wird x_0 durch den Ausdruck gegeben:

$$x_0 = x_1 + \alpha_1 \frac{x_2 - x_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

In dem obigen Beispiel waren:

$$x_1 = 113 \quad \alpha_1 = 12$$
$$x_2 = 114 \quad \alpha_2 = 19,$$

woraus der angegebene Werth für x_0 folgt.

Diese Methode der Interpolation, durch die man eine weitere über den Bereich des Widerstandskastens hinausgehende Decimale erhält, ist besonders werthvoll, wenn die zu messenden Widerstände so klein sind, dass man allein durch Ablesung des gestöpselten Vergleichswiderstandes eine zu geringe Genauigkeit erhalten würde.

9. Bei der Bestimmung sehr kleiner Widerstände, wie sie bei kürzeren Kabeln von sehr starkem Querschnitt auftreten, kann es geschehen, dass die Zuleitungsdrähte einen vielfach grösseren Widerstand haben als die zu messenden Widerstände selbst; auch fällt der Uebergangswiderstand an den Verbindungsstellen störend ins Gewicht. Für solche Fälle bedient man sich zweckmässig der Doppelbrücke von Thomson. Bei dieser Anordnung ist man einerseits von den Zuleitungswiderständen gänzlich unabhängig, andererseits üben unvollkommene Kontakte nur einen geringen Einfluss aus. Man schaltet den unbekannten Widerstand x mit einem Normalwiderstand, der als Schleifdraht ausgebildet sein kann, hintereinander

in den Stromkreis einer Batterie mit kleinem Widerstande (Fig. 11). Die Endpunkte des unbekannten sowie zwei auf dem Normaldraht aufliegende Schleifkontakte sind nach der aus der Figur ersichtlichen

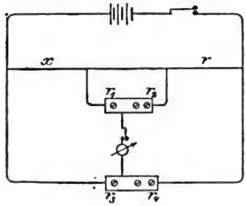


Fig. 11.

Weise mit vier Widerständen (Stöpselrheostaten) verbunden, zwischen denen als Brücke das Galvanometer liegt.

Man wählt zunächst die Widerstände r_1, r_2, r_3, r_4 so, dass die Verhältnisse $\frac{r_1}{r_3} = \frac{r_2}{r_4} = n$ werden, lässt den einen Schleifkontakt

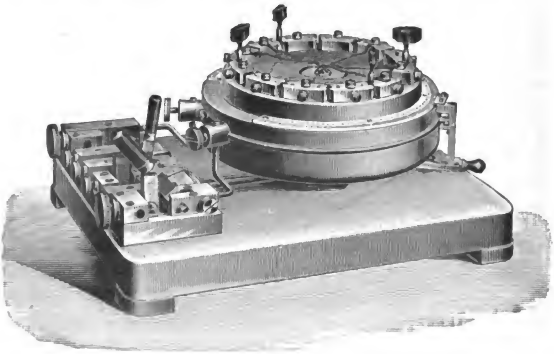


Fig. 12.

auf r fest und verschiebt den anderen so lange, bis der Strom im Galvanometer verschwindet, dann ist

$$x = n \, . \, r \qquad \qquad (6)$$

Die in Fig. 12 dargestellte Anordnung entspricht der von Siemens & Halske fabricirten Form der Doppelbrücke. Der Messdraht aus Nickelin ist kreisförmig aufgerollt und wird von einem Kontaktröllchen bestrichen, dessen Lage mittels Nonius genau abzulesen ist. Die Vergleichswiderstände $r_1 \ldots r_4$ sind auf einem Holzsockel angeordnet. Ihr Verhältniss ist stets gleich einer Potenz von 10.

Eine etwas abgeänderte, für rasche Messungen recht bequeme Form der Thomson-Brücke wird von Otto Wolff, Berlin, hergestellt. Als Vergleichswiderstand r dient ein Normalwiderstand

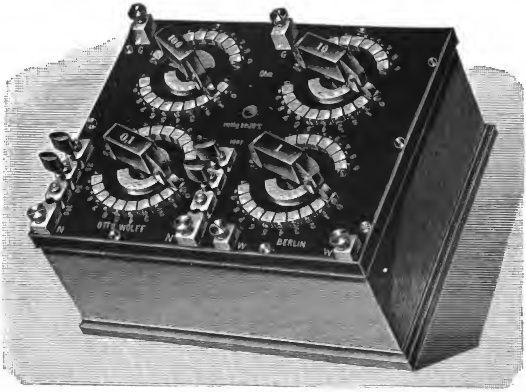


Fig. 13.

von 0,0001 bis 1 Ohm (Modelle der Physikalisch-technischen Reichsanstalt). Die Abgleichung wird hergestellt durch Veränderung der Widerstände r_1 und r_2, die durch mit vier Federkontakten versehene Doppelkurbeln stets in gleichem Sinne vor sich geht. Die äussere Form der Brücke, deren gutes Funktioniren indessen wesentlich von der Sauberkeit der Federkontakte abhängt, zeigt Fig. 13.

Hat man den Widerstand eines Kabels zu messen, so sind bei Anwendung der Thomson-Brücke vier Leitungen nothwendig (Fig. 14).

Zwei Leitungen dienen dazu, das Kabel in den Hauptstromkreis der Batterie einzuschalten, die beiden anderen übertragen die von

2*

dem Batteriestrome an den Enden des Kabels erzeugte Spannungsdifferenz zu den Widerständen r_1 und r_3. Es ist zu beachten, dass diese Leitungen, wie in der Figur angedeutet, stets innerhalb der durch die beiden Hauptstromleitungen abgegrenzten Kabelstrecke angeschlossen werden. Nur in diesem Falle fallen die Störungen durch Kontaktwiderstände fort.

Die Thomson-Brücke ist zur Messung der Widerstände kürzerer Kabel von starkem Querschnitt nahezu unentbehrlich und sollte in keinem für Kabelmessungen dienenden Prüfzimmer fehlen.

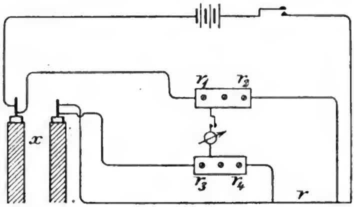


Fig. 14.

10. Für die Messung hoher Isolationswiderstände, wie sie bei Kabelmessungen auftreten, ist fast allgemein die „Methode des direkten Ausschlags“ in Gebrauch. Bei derselben wird eine Batterie, deren einer Pol an Erde liegt, mit ihrem anderen Pol über ein Galvanometer an die Kabelseele angelegt, während die Isolationshülle des Kabels ebenfalls in innige Berührung mit der Erde gebracht wird. Das Galvanometer zeigt dann die Stärke des Stroms an, der durch die Isolationsschicht hindurchzufliessen vermag. Zu solchen Messungen dienende Galvanometer müssen also für sehr schwache Ströme empfindlich sein. Im Gegensatz dazu muss das Galvanometer empfindlich sein gegen sehr kleine Potentialdifferenzen, wenn es sich um Fehlerbestimmungen handelt.

Betrachten wir einmal, um diesen Unterschied etwas näher zu beleuchten, ein Galvanometer mit einem Widerstande g, an dessen Enden eine Potentialdifferenz V_1 wirkt, die gerade so gross ist, um den kleinsten noch ablesbaren Ausschlag hervorzurufen. Dann gilt die Gleichung:

$$\frac{V_1}{g} = C_1 \qquad (7)$$

wo C_1 die Stromstärke ist, die den kleinsten noch ablesbaren Ausschlag hervorbringt. C_1 nennt man die Empfindlichkeitskonstante des Galvanometers[1]).

Sucht man demnach ein Galvanometer, dessen hauptsächliche Aufgabe in der Messung hoher Isolationswiderstände bestehen soll, so muss man ein solches wählen, dessen C_1 klein ist. Für Fehlerbestimmungen dagegen ist ein möglichst kleiner Werth von V_1 erwünscht; daher ist ein Instrument mit höherer Empfindlichkeitskonstante C_1, aber geringem Widerstande unter Umständen besser als ein anderes mit sehr hohem Widerstande, das noch gegen sehr schwache Ströme empfindlich ist. Für die Zwecke der Fehlerbestimmungen ist noch eine zweite Forderung zu beachten. Die Nadel des Instruments darf keine zu grosse Schwingungsdauer haben. Dasselbe muss so nahe aperiodisch sein, wie es eben mit der Empfindlichkeit verträglich ist. Eine möglichst handliche äussere Form ist für beide Zwecke erwünscht.

Das Gesagte möge noch durch Diskussion der Empfindlichkeitsverhältnisse zweier Instrumente derselben Firma erläutert werden. Das eine Galvanometer hat 3500 Ohm Widerstand und eine Empfindlichkeit von 2×10^{-9} Ampère, wenn der Astasirungsmagnet so eingestellt ist, dass die Nadel zu einem vollständigen Hin- und Hergang 9 Sekunden gebraucht. Die Empfindlichkeit kann bis auf 2×10^{-10} Ampère gebracht werden, wenn man die Periode auf 28 Sekunden erhöht. Dieses Instrument ist vornehmlich der Messung hoher Isolationswiderstände angepasst, zumal wenn es auf grosse Handlichkeit nicht ankommt.

Dieselbe Firma baut auch ein aperiodisches Galvanometer nach dem Princip Deprez-d'Arsonval. Dieses letztere Instrument hat eine Empfindlichkeit von $3{,}5 \,.\, 10^{-9}$ Ampère, aber nur einen Widerstand von 1600 Ohm. Sein Preis ist nur halb so hoch wie der des erstgenannten Instruments, und es ist sehr kompendiös. Nun ist für das Instrument mit dem höheren Widerstande bei einer Periode von 9 Sekunden — eine niedrigere Periode ist für rasch auszuführende Brückenmessungen und Fehlerbestimmungen nicht wohl angängig —

[1]) Man hat neuerdings eine andere Definition für die Empfindlichkeit eines Galvanometers eingeführt, nämlich den Ausschlag in Skalentheilen, den der Strom von 1 Mikroampère (10^{-6} Ampère) hervorbringt bei 1 m Skalenabstand und einer Periode von 10 Sekunden.

$$V_1 = g\,C_1 = 3500 \,.\, 2 \,.\, 10^{-9} = 7 \,.\, 10^{-6}\,,$$

für das aperiodische Instrument

$$V_1 = 1600 \,.\, 3{,}5 \,.\, 10^{-9} = 5{,}6 \,.\, 10^{-6}$$

Daher ist das zweite Galvanometer dem ersteren in jeder Hinsicht vorzuziehen. Sein V_1 ist kleiner, es ist aperiodisch und leicht transportirbar, und schliesslich kostet es nur die Hälfte.

Diese Betrachtungen können als Richtschnur dienen bei der Auswahl eines Galvanometers für das Messbureau einer Centralanlage. Gewöhnliche Widerstandsmessungen erfordern keine hochempfindlichen Galvanometer. Wenn daher nicht öfter Messungen von hohen Isolationswiderständen vorkommen, so hat es keinen Sinn, ein theures Galvanometer mit hohem Widerstande und kleinem C_1 zu kaufen. Vielmehr ist ein solches mit geringerem Widerstande vorzuziehen, welches unter Umständen einen eben so niedrigen, oder wenigstens nahezu so niedrigen Werth für V_1 liefern kann, wie das theuerere Instrument.

Angenähert lässt sich die maximale Empfindlichkeitskonstante berechnen, die das Galvanometer für die auszuführenden Isolationsmessungen haben kann. Angenommen, der höchste zu messende Isolationswiderstand sei 2500 Megohm und die E.M.K. der zur Verfügung stehenden Messbatterie sei 250 Volt. Dann wird während der Messung bei Anwendung der Methode des direkten Ausschlags durch das Galvanometer ein Strom gehen von der Intensität

$$\frac{250}{2500 \,.\, 10^6} = 1 \,.\, 10^{-7} \text{ Ampère.}$$

Um eine recht genaue Messung zu erhalten, wollen wir fordern, dass dieser Strom eine Ablenkung von 20 Skalentheilen hervorrufen soll. Daraus ergiebt sich die zu verlangende Empfindlichkeit des Instruments zu

$$C_1 = \frac{10^{-7}}{20} = 5 \,.\, 10^{-9} \text{ Ampère.}$$

11. Die für Isolations- und Fehlermessungen gebräuchlichen Galvanometer sind entweder solche mit beweglichem Magnetsystem oder solche mit beweglicher Spule nach dem Princip Deprez-d'Arsonval. Die Fülle der vorhandenen guten Instrumente erfordert auch hier die Beschränkung auf die Beschreibung einiger

von Fabrikanten ersten Ranges gebauten Typen, welche für die genannten Zwecke besonders angemessen sind.

Von den Galvanometern mit beweglichem Magnetsystem sei das astatische Spiegelgalvanometer von Siemens & Halske erwähnt. Ein vertikaler Kupferrahmen trägt die 4 Spulen, die hintereinander geschaltet einen Widerstand von etwa 16000 Ohm ergeben. Das astatische Magnetsystem besteht aus 2 Glockenmagneten, die zur Erzielung möglichster Dämpfung in Kupfergehäusen schwingen. Durch eine Arretirvorrichtung lässt es sich fest stellen. Die unterhalb des das Instrument tragenden Messingdreifusses angebrachten beiden Richtmagnete sind durch Zahnräder verstellbar. Das Instrument eignet sich vorzüglich für Streckenmessungen. Fig. 15 zeigt es mit einer Kompensationsvorrichtung versehen, um die Störungen des Erdfeldes herabzumindern.

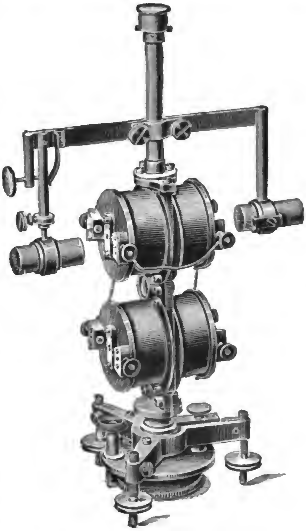


Fig. 15.

In Fig. 16 ist das aperiodische Fernrohrgalvanometer von Hartmann & Braun abgebildet. In diesem Instrument besteht das Magnetsystem aus einem Glockenmagneten im Kupfergehäuse. Je nach den benutzten Multiplikatorrollen ist eine Empfindlichkeit bis $3 \cdot 10^{-7}$ Ampère ohne Astasirung erreichbar. Behufs rascher Orientirung der Windungsebene in den magnetischen Meridian ist über dem Spiegel ein Polzeiger für den Magnet angebracht.

Fig. 17 zeigt ein Galvanometer mit Zeiger von Nalder Bros. & Co., das ausserordentlich handlich und dabei ziemlich empfindlich ist. Er passt in ein Lederfutteral und kann bequem an einem Riemen über der Schulter getragen werden.

Sind die Messungen in Fabriklaboratorien vorzunehmen, wo sich

in unmittelbarer Nähe der Instrumente bewegte Eisenmassen von beträchtlichen Dimensionen oder gar von elektrischen Maschinen herrührende starke Magnetfelder befinden, so sind die Galvanometer nach dem Deprez-d'Arsonval-Princip mit beweglicher Spule und feststehendem Magnetfeld entschieden vorzuziehen, weil sie gänzlich

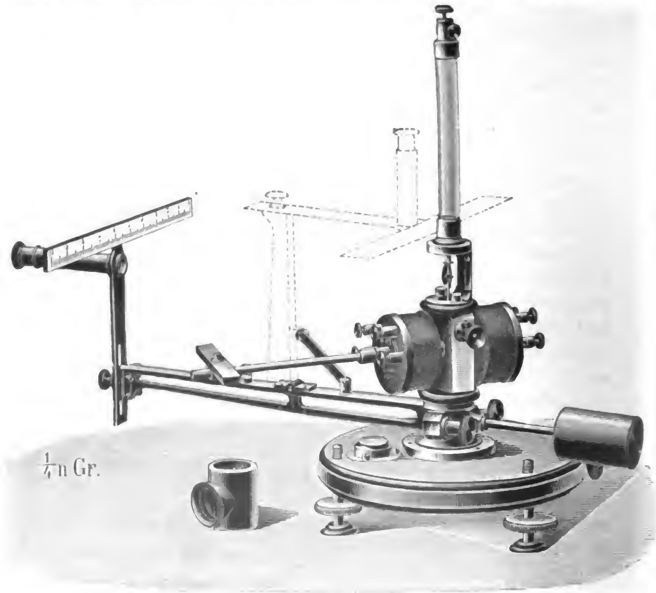


Fig. 16.

unabhängig sind von äusseren magnetischen Einflüssen. Zudem eignen sie sich insbesondere gut zu Fehlerbestimmungen und anderen Brückenmessungen, insofern als sie einen geringen Widerstand besitzen und trotzdem ihr V_1 (die Empfindlichkeit gegen Spannungsdifferenzen) nicht hinter dem der Galvanometer mit beweglichem Magnetsystem und hohem Eigenwiderstande zurückbleibt. Eine dritte schätzenswerthe Eigenschaft ist, dass sie nahezu vollkommen aperiodisch sind. Diese Erscheinung rührt her von der Selbstinduktion

der Spule, die, einen geschlossenen Stromkreis bildend, sich in einem magnetischen Felde bewegt. Dadurch wird eine elektromotorische Kraft in ihr inducirt, entgegengesetzt der, welche die Drehung hervorbringt. Die Energie, welche zur Erzeugung dieser gegenwirkenden elektromotorischen Kraft benöthigt wird, muss geliefert werden durch die Bewegung der Spule, die auf diese Weise gedämpft wird.

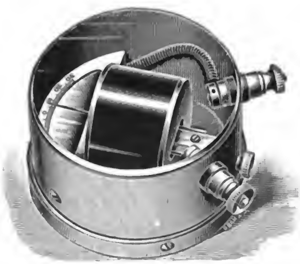


Fig. 17.

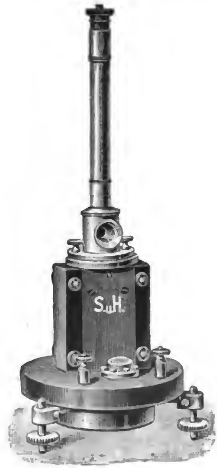


Fig. 18.

Ein Instrument, das in hervorragender Weise sich als zu Isolationsmessungen geeignet erweist, ist das Spiegelgalvanometer nach Deprez-d'Arsonval von Siemens & Halske[1]) (Fig. 18). Dasselbe besteht aus zwei Theilen, einem nach Lösen zweier Schrauben herausziehbaren Messingrohr, das einen Eisenkern und die bewegliche Spule trägt, und dem Magnetsystem, das von 6 nebeneinander befindlichen Hufeisenmagneten gebildet wird. Der als dickwandiger Hohlcylinder konstruirte Eisenkern dient dazu, das Feld möglichst gleichmässig zu machen. Zwischen den Polschuhen ist an einem

[1]) H. Sack, E. T. Z. 1896, S. 587.

feinen, aus Phosphorbroncedraht gewalzten Bande, das gleichzeitig den Spiegel trägt, ein aus elektrolytischem Kupfer gefertigter, mit

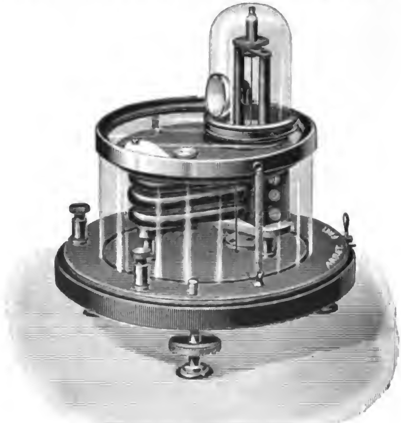


Fig. 19.

Kupferdraht von reinstem Kupfer bewickelter Rahmen aufgehängt, dessen Breite zu Länge sich wie 5 : 6 verhalten. Der Strom wird



Fig. 20.

den Windungen der Spule durch das Metallband und von unten durch eine feine Spiralfeder aus Silberdraht zugeführt. Mittels einer Arretirung lässt sich die Spule für den Transport feststellen. Das

ganze bewegliche System wiegt nur 6 g. Das Gesammtgewicht des Instruments beträgt nur $3^1/_2$ kg, wodurch es für Messungen auf der Strecke sehr geeignet wird. Der Draht auf der beweglichen Spule hat bei dem empfindlichsten Instrument einen Durchmesser von 0,05 mm. Der Widerstand kann durch einen Vorschaltwiderstand auf 10000 Ohm gebracht werden. Um die Empfindlichkeit des Instruments innerhalb mässiger Grenzen variiren zu können, ist neuerdings an demselben ein verstellbarer magnetischer Nebenschluss angebracht. Durch denselben wird den magnetischen Kraftlinien ein zweiter Weg geboten, auf welchem sie die stromdurchflossene Spule des Galvanometers nicht beeinflussen. Ist der Nebenschluss ganz über die Magnete geschoben, so ist die Empfindlichkeit des Galvanometers etwa 40 % geringer, als wenn er ganz zurückgeschraubt ist.

Tabelle I.

Bezeichnung	Widerstand in Ohm	Periode in Sekunden	C_1 Ampère	V_1 Volt
Vierspuliges Spiegelgalvanometer von Elliot Br.	7000	10	$2{,}8 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Hartmann & Braun's astatisches aperiod. Spiegelgalvanometer	5000	10	$2{,}5 \cdot 10^{-9}$	$7{,}5 \cdot 10^{-6}$
Astatisches Spiegelgalvanometer von Siemens & Halske	18000	10	$1{,}14 \cdot 10^{-9}$	$2{,}05 \cdot 10^{-5}$
Nalder Bros. tragbares Galvanometer (Fig. 17) . .	1000	—	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Deprez d'Arsonval Galvanometer von Siemens & Halske . . . . . I.	15	5	$2{,}5 \cdot 10^{-8}$	$3{,}7 \cdot 10^{-7}$
do. . . . . . II.	350	14	$7{,}8 \cdot 10^{-10}$	$2{,}7 \cdot 10^{-7}$
Deprez d'Arsonval Galvanometer von Edelmann	600	18	$1 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-7}$
Hartmann & Braun's d'Arsonval mit Zeiger. . .	40	aperiodisch	$1 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$
do. kleineres Instrument	50		$2{,}5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$

Fig. 19 zeigt ein d'Arsonval-Galvanometer der Firma Hartmann & Braun. Dasselbe trägt ausser dem Spiegel noch einen

Zeiger für direkte Ablesung. Ein anderes, weniger empfindliches, aber noch kompendiöseres Instrument derselben Firma, in dem die Spule zwischen zwei Spitzen gelagert ist, ist in Fig. 20 abgebildet.

Die vorstehende Tabelle giebt eine Uebersicht über die Empfindlichkeiten verschiedener Galvanometer. Bei den Spiegelinstrumenten ist ein Skalenabstand von 1 m zu Grunde gelegt und als Länge eines Skalentheils 1 mm. Für die in der Tabelle aufgeführten Zeigerinstrumente sind C_1 und V_1 die Stromstärken und Spannungen, die erforderlich sind, um eine Ablenkung von 1^0 hervorzubringen.

12. Für die Beobachtung an Spiegelinstrumenten kommt bei technischen Messungen nur die sogenannte objektive Methode der Spiegelablesung in Betracht. Dieselbe hat, abgesehen davon, dass mehrere Personen zugleich die Ablenkungen beobachten können, besonders bei ausgedehnten Messreihen gegenüber der Fernrohrablesung den Vorzug, weit weniger zu ermüden, ohne dass die Genauigkeit der Ablesung wesentlich geringer wäre. Die schematische Anordnung ist bekanntlich die, dass ein Lichtstrahl auf den Spiegel geworfen wird, der ihn auf eine in gewisser Entfernung aufgestellte Skala reflektirt. Als Spiegel sind zweckmässig Hohlspiegel, nicht Planspiegel zu wählen. Die übliche Brennweite derselben beträgt 50 cm, wobei man als Abstand zwischen Spiegel und Skala dann 1 m zu wählen hat. Die specielle Anordnung von Lampe und Skala lässt sich in verschiedener Weise treffen. Eine der älteren Formen zeigt Fig. 21. Die Skala wird vor dem Galvanometer im doppelten Abstand der Brennweite des Spiegels aufgestellt — die Grösse des zu wählenden Abstandes ist gewöhnlich auf dem Galvanometer angegeben. Die Lampe — in der Regel eine Petroleumlampe — steht hinter dem Skalenständer, in dem sich ein schmaler senkrechter Schlitz befindet, dessen Breite mittels eines messingnen Schiebers eingestellt werden kann. Die Breitseite der Flamme muss der Schlitzebene parallel sein. Diese Anordnung ist noch immer sehr gebräuchlich, besonders für Messungen auf der Strecke.

Eine Erhöhung der Lichtintensität wird erreicht, wenn man den Schlitz durch eine Bikonkavlinse von 8—10 cm Brennweite ersetzt. Die Lampe wird in dieser Entfernung hinter die Linse gestellt und ein Draht senkrecht quer vor die letztere gespannt. Bei dieser Aufstellung wird ein scharfes Bild der Linse und des Drahtes vom Galvanometerspiegel auf die Skala reflektirt. Eine weitere Verbesserung besteht darin, eine transparente Skala aus Milchglas, Cellu-

loid oder Pauspapier zu nehmen, bei der die Lage des vom Galvanometerspiegel reflektirten Lichtflecks auch von der dem Galvanometer abgewandten Seite der Skala abgelesen werden kann. Ferner braucht man bei der Anwendung solcher Skalen das Zimmer nicht zu verdunkeln, wenn man nur verhütet, dass senkrecht zur Skala Licht auffallen kann. Fig. 22 zeigt eine solche Aufstellung mit transparenter Skala, elektrischer Lampe und Linse.



Fig. 21.



Fig. 22.

Man kann auch die Skala parallel zu dem von der Linse ausgehenden Lichtstrahl aufstellen und mittels eines zweiten Spiegels den Strahl in die Richtung des Galvanometerspiegels reflektiren. Folgende recht bequeme Anordnung wird in Frankreich fast ausschliesslich benutzt. Unmittelbar unter der Skala, die dem Galvanometer gegenüber aufgestellt ist, in einem Abstande vom Galvanometer gleich dem doppelten der Brennweite des Hohlspiegels dieses Instrumentes, befindet sich ein Schirm mit einem rechteckigen Fenster oder einem weiten Schlitz. Ein vertikaler Draht ist quer davor ausgespannt. Hinter dem Fenster, zwischen diesem und dem Beobachter ist ein ebener Spiegel angebracht, der sich in jeder Richtung drehen lässt. Der Beobachter stellt denselben so ein, dass das Licht irgend einer Lichtquelle durch den Schlitz auf den Galvanometerspiegel geworfen wird; dieser reflektirt es auf die transparente Skala. Verdunkelung

des Zimmers ist nicht nöthig. Es ist nur erforderlich, dass das gesammte Licht, das den Tisch trifft, auf dem die Instrumente stehen, parallel zur Skala läuft, oder mit anderen Worten, dass Vorder- und Rückseite der Skala durch das in streifender Incidenz sie treffende Licht gleich hell beleuchtet werden. Zweckmässig stellt man einen

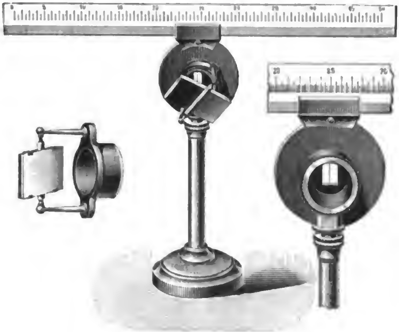


Fig. 23.

Gasbrenner oder eine Glühlampe seitlich an dem einen Ende der Skala auf. Oft genügt auch schon das einfache Tageslicht, wobei indess die Instrumente so anzuordnen sind, dass die Skala rechtwinklig zum Fenster steht. Fig. 23 giebt ein Bild von Skala und Zubehör, wie sie die Werkstätten von J. Carpentier, Paris, herstellen.

13. In vielen Fällen ist es wünschenswerth und nothwendig, die Empfindlichkeit eines Galvanometers um einen bestimmten Bruchtheil zu verringern. Dieser Zweck wird erreicht durch Anbringen eines Nebenschlusses zu den Galvanometerklemmen.

In Fig. 24 ist schematisch der Stromverlauf bei Anwendung eines Nebenschlusses angedeutet.

Der Hauptstrom i verzweigt sich in A und B in den Nebenschlussstrom i_1 und den das Galvanometer vom Widerstande w_2 durchfliessenden Strom i_2. Der Widerstand des Nebenschlusses sei w_1.

Nach den Kirchhoff'schen Gesetzen bestehen die Gleichungen

$$i = i_1 + i_2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad (8)$$

$$i_1 : i_2 = w_2 : w_1 . \quad \ldots \ldots \ldots \quad (9)$$

Aus (9) folgt:

$$i_1 = \frac{w_2}{w_1} i_2.$$

Diesen Werth in (8) eingesetzt ergiebt:

$$i = i_2 \frac{w_1 + w_2}{w_1} = i_2 \left\{1 + \frac{w_2}{w_1}\right\}. \quad \ldots\ldots \quad (10)$$

Nun wählen wir:

$$w_1 = \frac{w_2}{p-1}.$$

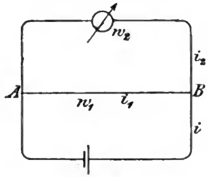


Fig. 24.

Dann geht Gleichung (10) über in:

$$i = i_2 \left\{1 + \frac{w_2}{w_2} p - 1\right\}$$
$$= i_2 \{1 + p - 1\}$$
$$= i_2 p$$

oder:

$$i_2 = \frac{i}{p} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

Die Stromstärke im Galvanometer ist also nur $\frac{1}{p}$ der im Hauptstromkreise herrschenden. Da die Galvanometerausschläge cet. par. den Stromstärken proportional sind, so ist auch der Ausschlag mit Nebenschluss nur $\frac{1}{p}$ desjenigen, den das Instrument ohne Nebenschluss geben würde. Will man einen Galvanometerausschlag also durch Nebenschliessung auf $^1/_{10}$ seines eigentlichen Werthes reduciren, so hat man einen Nebenschluss anzuwenden, dessen Widerstand $^1/_9$ des Galvanometerwiderstandes beträgt, bei Reduktion auf $^1/_{100}$ $^1/_{99}$ desselben u. s. f. Allgemein ist, falls man die Empfindlich-

keit auf $\frac{1}{p}$ vermindern will, ein Nebenschluss zu wählen, dessen Widerstand $\frac{1}{p-1}$ des Galvanometerwiderstandes beträgt.

Aus Bequemlichkeitsgründen werden die Nebenschlüsse in der Regel so gewählt, dass die Empfindlichkeit des Instruments auf $^1/_{10}$, $^1/_{100}$, $^1/_{1000}$ und zuweilen bis $^1/_{10000}$ des ursprünglichen Werthes herabgesetzt wird. Derartige Nebenschlusswiderstände werden jedem Galvanometer beigegeben. Ihre Form zeigt Fig. 25. Die neben den



Fig. 25.

Stöpsellöchern stehenden Zahlen geben an, welchen Bruchtheil des Galvanometerwiderstandes der zugehörige Nebenschlusswiderstand beträgt. Ist z. B. der Nebenschlusswiderstand $^1/_{99}$ gestöpselt, so ist die unter diesen Umständen erhaltene Galvanometerablesung mit 100 zu multipliciren.

14. Es erübrigt noch, einige Hülfsapparate zu erwähnen, die insbesondere bei Isolationsmessungen nahezu unentbehrlich sind. In Fig. 26 ist ein sog. Kurzschlussunterbrecher abgebildet. In seiner normalen Stellung schliesst er das Galvanometer kurz, während durch Herunterdrücken des Knopfes der Stromkreis geöffnet wird. Die Kurzschliessung des Galvanometers hat den Zweck, zu verhüten, dass der beim Einschalten des Batteriestroms und auch beim Entladen des Kabels entstehende heftige Stromstoss das Galvanometer durchfliesst. Sehr bequem und weit verbreitet ist der Stromschlüssel für Isolationsmessungen von Siemens & Halske. Fig. 27 stellt denselben schematisch im Grundriss dar. Fig. 28

giebt ein Bild der äusseren Form. Von a geht die Leitung zum Stromkreis, b liegt an Erde, c geht zum positiven Pol der Batterie, d und e, die mit einander verbunden sind, zum negativen. In der Ruhelage haben die Hebel A_1 A_2 Kontakt mit den Platin-

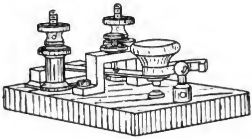


Fig. 26.

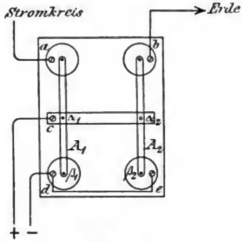


Fig. 27.

stiften α_1 α_2, während sie von β_1 β_2 isolirt sind. Ein Strom kann nicht zu stande kommen, da der — Pol isolirt ist, der + Pol und die Klemmen a an Erde liegen. Drückt man A_1 herunter, so wird der Kontakt bei α_1 gelöst, der bei β_1 geschlossen, der positive Pol



Fig. 28.

ist über α_2 mit Erde verbunden, während der negative über β_1 durch den Hebel A_1 an a, dem Stromkreis, liegt. Drückt man A_2, so findet das Umgekehrte statt. Der negative Pol ist über β_2 geerdet, während der positive über α_1 zum Stromkreis geht. Man kann also mit dem Schlüssel den Strom in beiden Richtungen durch die Kabel-

isolation senden. Bei Ausschalten des Stromes wird das Kabel sofort an Erde gelegt und so entladen.

In allen Fällen, wo empfindliche, nur für ganz schwache Ströme bestimmte Messinstrumente in Stromkreisen benutzt werden, die unter mehr oder minder hohen Spannungen stehen, ist zum Schutz der Instrumente eine Abschmelzsicherung mit denselben in Serie zu schalten. Insbesondere gilt das für Präcisionswiderstände und Galvanometer. Bei der Wheatstone'schen Brücke verfährt man am besten so, dass man eine Sicherung für eine maximale Stromstärke von etwa $^1/_2$ Ampère sowohl in den Batteriezweig — zwischen

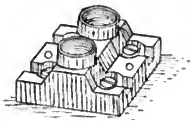


Fig. 29.



Fig. 30.



Fig. 31.

Batterie und Brücke, nicht zwischen Batterie und Erde — wie auch in den Galvanometerkreis legt. In die Brückenzweige selbst noch besondere Widerstand bildende Theile einzuführen, ist nicht rathsam.

Fig. 29 zeigt eine Sicherungsfassung der Allgemeinen Elektricitäts-Gesellschaft. Der Schmelzdraht befindet sich in dem kleinen Stöpsel (Fig. 30) und wird in die Leitung eingeschaltet, indem man den Stöpsel in die Fassung einschraubt. Fassung und Stöpsel sind aus Porzellan, das Gewinde aus Messing, der Schmelzdraht ist Silber.

Eine andere Form zeigt die Sicherung von Hartmann & Braun (Fig. 31). Der Gold- oder Silberdraht befindet sich in einem mit Messingkappen versehenen Glasrohr, das in einem Hartgummikopf eingeschraubt ist. Ein abgeschmolzener Draht lässt sich leicht durch Einsetzen eines neuen Rohres ersetzen.

Fig. 32 stellt eine Sicherung nach Mordey dar, wie sie die Brush Electrical Engineering Company fabricirt. Dieselbe lässt sich auch in Hochspannungsnetzen verwenden. Sie besteht aus einem

dünnen Kupferdraht in einem Glasrohr, das an beiden Enden Messingkappen trägt. Das Glasrohr ist mit einem nichtleitenden und unverbrennlichen Pulver gefüllt. Mittels zweier Messingstützen ist die Sicherung auf einem Marmor- oder Porzellanblock montirt. Bildet sich beim Durchbrennen der Sicherung ein Lichtbogen, so wird derselbe durch das Pulver unterdrückt.

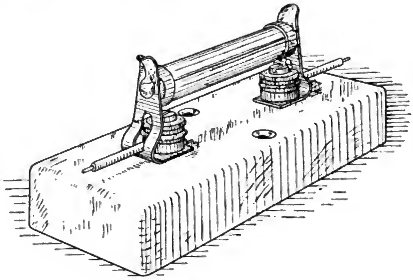


Fig. 32.

15. Jedes Kabel wird vor seiner Verlegung einer sorgfältigen Messung seines Isolationswiderstandes bereits in der Fabrik unterzogen. Die für die Messung so hoher Isolationswiderstände, wie sie bei kurzen Kabellängen auftreten, fast ausschliesslich angewandte Methode ist, wie bereits erwähnt, die Methode des direkten Ausschlags.

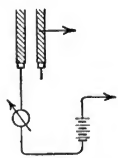


Fig. 33.

Fig. 33 zeigt das Schema der Schaltung, Fig. 34 giebt eine genaue Skizze der Anordnung.

Sind in einem einfachen Stromkreis hintereinandergeschaltet eine Batterie der elektromotorischen Kraft E, ein Galvanometer G und ein Widerstand W, in welchem der Galvanometerwiderstand mit

einbezogen ist, während gegen ihn der innere Widerstand der Batterie selbst vernachlässigt werden kann, so ist der durch die Stromstärke J im Galvanometer hervorgebrachte Ausschlag n

$$n = c \,.\, J = c \,.\, \frac{E}{W}, \qquad (12)$$

wo c die Galvanometerkonstante ist.

Wird nun der Widerstand W durch einen unbekannten Widerstand x ersetzt, so möge der Ausschlag n_1 erhalten werden:

$$n_1 = c \,.\, \frac{E}{x}. \qquad (13)$$

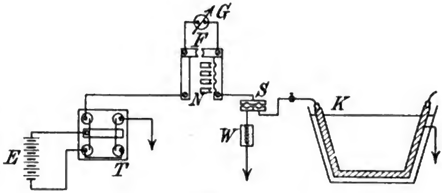


Fig. 34.

Durch Division beider Gleichungen folgt:

$$\frac{n}{n_1} = \frac{x}{W}$$

und daraus:

$$x = \frac{n}{n_1}\, W = \frac{n\, W}{n_1}. \qquad (14)$$

Diese Methode ist unmittelbar auf die Messung von Isolationswiderständen anwendbar. Man ersetzt in Fig. 34 mittels des Stöpselschalters S das Kabelstück zunächst durch einen Vergleichswiderstand W von bekannter Grösse, z. B. 1 Megohm oder 100000 Ohm, und beobachtet den Ausschlag, darauf schaltet man das Kabelstück in der Weise ein, dass die Seele mit der vom Galvanometer kommenden Leitung verbunden wird, während die Isolationsschicht an Erde liegt und ein Pol der Batterie gleichfalls geerdet ist. Man erhält wiederum einen Ausschlag von gewisser Grösse und ist nun in der Lage, den Isolationswiderstand nach Formel (14) zu berechnen. Der Isolationswiderstand ist in der Regel vielmals höher als der Ver-

gleichswiderstand; um also am Instrument Ablenkungen von gleicher Grössenordnung zu erhalten, ist es nothwendig, bei der Messung mit dem Vergleichswiderstande dem Galvanometer einen passenden Nebenschluss N parallel zu schalten. Die Ablenkung ist dann natürlich mit einem dem gewählten Nebenschluss entsprechenden Faktor zu multipliciren, und der so erhaltene wahre Ausschlag für den Fall, dass der Nebenschluss nicht vorhanden gewesen wäre, zur Berechnung von x nach Formel (14) zu benutzen. Die Grösse $n\,W$ nennt man wohl auch die Empfindlichkeit oder die Konstante des Instruments für Isolationsmessungen. Es ist derjenige Widerstand, der bei der vorhandenen Messspannung am Galvanometer einen Ausschlag von 1 Skalentheil hervorbringen würde. Bei der Bestimmung eines Isolationswiderstandes nach der in Fig. 34 angegebenen Schaltung hat man also folgendermassen zu verfahren. Zu Beginn der Messung ist das Galvanometer durch den Stöpsel F kurzgeschlossen. Man stöpselt in S den Vergleichswiderstand W in den Stromkreis ein, giebt dem Galvanometer einen geeignet erscheinenden Nebenschluss und drückt eine Taste des Schlüssels T, so dass ein Pol der Batterie auf den Stromkreis geschaltet ist, während der andere an Erde liegt. Erhält man nach Entfernen des Galvanometerkurzschlusses eine zu grosse Ablenkung, so wählt man einen anderen Nebenschluss, bis der Ausschlag einen passenden Werth erreicht. Durch diese Messung wird die Empfindlichkeit des Instruments $n\,W$ bestimmt. In ganz gleicher Weise wird nun verfahren, nachdem der Umschalter S auf das Kabel gestöpselt ist. Vor Beginn der Messung, d. h. vor dem Einschalten des Galvanometerschlüssels ist das Galvanometer mittels des Kurzschlussstöpsels F kurz geschlossen, damit der Ladestrom des eine beträchtliche Kapacität darstellenden Kabels das Galvanometer nicht durchfliessen kann. Einige Sekunden nach erfolgtem Stromschluss entfernt man den Kurzschluss und beobachtet den Ausschlag. In gleicher Weise muss vor dem Ausschalten des Batteriestromes das Galvanometer kurz geschlossen werden, um den Entladungsstromstoss von ihm abzuhalten. Das Kabel befindet sich in der Regel in einem mit Wasser gefüllten Tank, damit die Isolationshülle sich auf ihrer ganzen Oberfläche in möglichst inniger Berührung mit der Erde befindet. In diesem Bassin verbleibt es 24 Stunden lang vor der Messung, einerseits, damit eventuell kleinere Fehler in der Bleiumpressung zur Anzeige gelangen, andererseits damit das Innere sicher eine konstante Temperatur annimmt. Die Enden des Kabels

müssen sauber geputzt, besonders frei von Feuchtigkeit sein, und die Zuleitung muss auf das vorzüglichste isolirt werden. Die Isolation der Zuleitung wird übrigens in der gleichen Weise wie die des Kabels gemessen, und der Ausschlag, der nur klein sein darf, von dem bei Einschaltung des Kabels erhaltenen abgezogen. Man erhält nun nach Aufheben des Galvanometerkurzschlusses nicht einen konstanten Ausschlag, vielmehr geht derselbe allmählich zurück, um in der Regel erst nach längerer Zeit, oft erst nach Stunden, einen konstanten Werth anzunehmen. Dieses allmähliche Zurückgehen des Ausschlags, das gerade ein Charakteristikum für ein gutes, fehlerfreies Kabel bildet, hat seinen Grund in den eigenthümlichen Erscheinungen, die den Stromdurchgang durch Dielektrika begleiten. Der Charakter dieses Buches verbietet es indessen, auf dieses interessante, noch wenig erforschte Gebiet hier näher einzugehen.

Die Abnahme des Ausschlags mit der Zeit der Elektrisirung des Dielektrikums hat zur Folge, dass man einen um so grösseren Isolationswiderstand erhält, eine um so längere Zeit man zwischen dem Einschalten der Batterie und der Ablesung verstreichen lässt. Die Zunahme erfolgt zuerst sehr schnell, dann langsamer, bis sich schliesslich der Isolationswiderstand einem Grenzwerthe nähert. Man wartet nun bei der Ausführung der Messung diese unter Umständen beträchtliche Zeit bis zum Konstantwerden des Ausschlags nicht ab, sondern macht je eine Ablesung nach 1 Min. und nach 2 Min. und giebt für diese Zeiten die Isolationswiderstände an. Auf jeden Fall ist es bei der Angabe eines Isolationswiderstandes erforderlich, die Zeit hinzuzufügen, nach der die Ablesung stattgefunden, da andernfalls die mitgetheilte Zahl ohne jeden wirklichen Werth ist.

Der Isolationswiderstand eines Kabels ist umgekehrt proportional der Länge desselben; er ist auch abhängig von der angewandten Messspannung. Indessen ist dieser Einfluss innerhalb mässiger Grenzen derselben nur unerheblich. In der Regel beträgt die Messspannung 150—250 Volt. Die Batterie besteht aus kleinen Akkumulatoren oder Trockenelementen. In sehr hohem Grade variirt der Isolationswiderstand mit der Temperatur. Es ist üblich, den Isolationswiderstand zu beziehen auf eine Länge von 1 km und eine Temperatur von 15°. Ist W_T der Isolationswiderstand eines Kabels bei 15°, W_t bei der Temperatur t, so kann man zwischen beiden Grössen die Beziehung aufstellen:

$$W_T = W_t\, a^{T-t}, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (15)$$

wo a eine vom Isolationsmaterial abhängige Konstante ist. Die Gleichung lässt sich auch schreiben

$$W_T = a\, W_t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad (16)$$

Der Werth von a ist für jede Temperatur aus einer für das betreffende Dielektrikum aufgestellten Tabelle zu entnehmen.

Beispiel: Bei Einschaltung eines Vergleichswiderstandes von 100000 Ohm und eines Galvanometernebenschlusses von $^1/_{10000}$ ergab sich ein Ausschlag von 200 Skalentheilen. Daraus berechnet sich die Konstante:

$$n\,W = 100000 \,.\, 200 \,.\, 10000 = 200000 \,.\, 10^6 \text{ Ohm}$$
$$= 200000 \text{ Megohm.}$$

Wurde das Kabel angelegt, so betrug der Ausschlag nach 1 Min. 77, nach 2 Min. 52 Skalentheile; für die Zuleitung sind zwei Skalentheile abzuziehen. Daraus folgt für den Isolationswiderstand

$$\text{nach 1 Min.:} \quad R_1 = \frac{200\,000}{75} = 2670 \text{ Megohm,}$$

$$\text{nach 2 Min.:} \quad R_2 = \frac{200\,000}{50} = 4000 \text{ Megohm.}$$

Die Länge des Kabelstücks war 500 m, die Temperatur betrug 17°. Der Reduktionsfaktor a ist für diesen Fall zu 1,56 anzunehmen (das Material bestand aus imprägnirter Jute):

Darnach ergiebt sich der Isolationswiderstand pro km bei 15°:

$$\text{nach 1 Min.:} \quad R_1 = \frac{2670 \,.\, 500 \,.\, 1{,}56}{1000} = 2080 \text{ Megohm,}$$

$$\text{nach 2 Min.:} \quad R_2 = \frac{4000 \,.\, 500 \,.\, 1{,}56}{1000} = 3120 \text{ Megohm.}$$

Nach der in den vorhergehenden Ausführungen beschriebenen Methode und den dort gegebenen Anweisungen wird jedes Kabel in der Fabrik auf das genaueste geprüft.

Bei sehr kurzen Kabelstücken, wo der Isolationswiderstand an und für sich sehr gross ist, kann der Stromübergang vom freien Ende des Kabels über die Oberfläche der Isolation zur Erde zu verhältnissmässig sehr grossen Fehlern Veranlassung geben, sobald die Isolation am freien Ende durch Feuchtigkeit, die von atmosphärischen Einflüssen herrühren kann, auch nur sehr wenig leitend geworden ist. Diese Störung wird beseitigt durch die Anwendung

eines sogenannten Schutzdrahtes (guard-wire) nach Price. Fig. 35 stellt schematisch die Verbindungen dar. Ein Draht *W*, dessen Ende blank ist, wird um die zurechtgemachten Enden des Kabels über die Isolation gewunden und sein Ende an *H*, die Batterieseite des Galvanometers, angelegt. Da die Stromstärke im Galvanometer gering ist, so ist die Potentialdifferenz zwischen *W* und dem Leiter *C* sehr klein und deswegen die Oberflächenleitung zwischen ihnen zu vernachlässigen, wenn die Oberfläche des Dielektrikums wenigstens einigermassen rein und trocken ist. Dagegen herrscht die volle Potentialdifferenz zwischen *W* und dem nassen Theile der Oberfläche. Der hier durch Oberflächenleitung entstehende Strom kann jedoch das Galvanometer nicht durchfliessen, ist also auf die Messung ohne Einfluss.

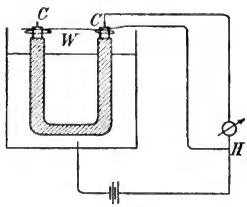


Fig. 35.

Der Isolationswiderstand eines Kabels hängt für ein bestimmtes Isolationsmaterial ab von der Stärke der Isolationsschicht und von dem Querschnitt des Kabels. Er wächst mit ersterer und nimmt mit dem Kupferdurchmesser, der ja gleich dem inneren Durchmesser der Isolation ist, ab. Bei stärkeren Querschnitten ist demnach bei gleicher Güte des Materials der Isolationswiderstand geringer als bei schwächeren.

Ist ein Kabel für Hochspannung bestimmt, so wird es in der Fabrik mit einer Spannung, die in der Regel das Doppelte der Betriebsspannung beträgt, $^1/_2$—1 Stunde geprüft. Die Sicherheitsregeln für elektrische Hochspannungsanlagen, herausgegeben vom Verbande Deutscher Elektrotechniker, schreiben über diesen Punkt unter § 1d vor:

Als isolirte Leitungen gelten umhüllte Leitungen, welche nach vierundzwanzigstündigem Liegen im Wasser bei Spannungen unter

3000 Volt die doppelte Betriebsspannung, bei höheren eine Ueberspannung von 3000 Volt gegen Wasser eine Stunde lang aushalten.

In gleicher Weise wie der Isolationswiderstand eines einzelnen Kabels lässt sich nun auch der eines ganzen Leitungsnetzes nach der Methode des direkten Ausschlags bestimmen. Derselbe nimmt ersichtlicherweise ab mit der Ausdehnung des Netzes, und wird schliesslich bei einigermassen grossen und verzweigten Leitungsnetzen so gering, dass man in solchen Fällen zweckmässig weniger empfindliche Instrumente zur Messung wählt, wie sie bei der Prüfung einzelner Kabel und kürzerer Kabelstrecken erforderlich sind.

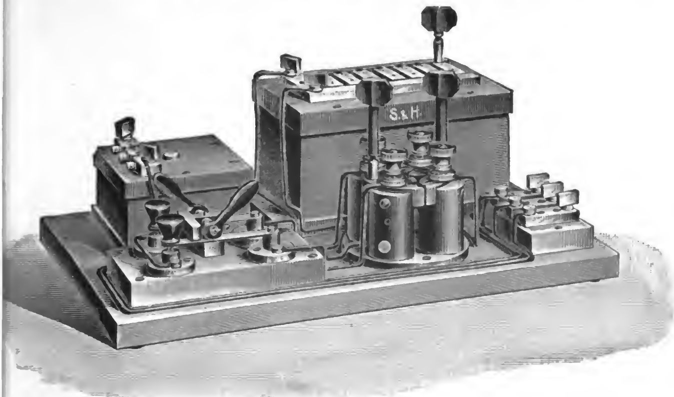


Fig. 36.

16. Die zur Ausführung von Isolationsmessungen nach der Methode des direkten Ausschlags nöthigen Instrumente sind vielfach zur bequemen Ausführung der Messungen zu einem Ganzen vereinigt. Eine solche Zusammenstellung sehr empfindlicher Apparate, wie sie insbesondere zur Prüfung einzelner Kabel benöthigt wird, ist die „Isolationsschaltung" der Firma Siemens & Halske (Fig. 36). Zu derselben ist zweckmässig als Galvanometer ein Deprez-d'Arsonval-Galvanometer der auf S. 25 beschriebenen Type zu wählen. Die einzelnen Bestandtheile der Schaltung sind: 1 Nebenschluss zum Galvanometer, ein Widerstand von 100000 Ohm zur Bestimmung der Empfindlichkeit, ein Stromwender auf Hartgummisäulen, ein Doppel-

schlüssel und ein Hartgummisockel mit 3 Messingklemmen zum Anlegen der Batterie und der Erdleitung.

Für genaue Messungen auf der Strecke, wie sie insbesondere bei der Verlegung von Kabelnetzen in grösserem Umfange nothwendig werden, sind die nothwendigen Instrumente in einem eigens für diesen Zweck ausgestatteten Wagen, einem Kabelmesswagen, vereinigt. Derselbe enthält auch ein empfindliches Spiegelgalvanometer, das auf einem Dreifuss aufgestellt wird, der durch eine im Boden des Wagens befindliche Oeffnung auf dem Erdboden festzustellen ist.

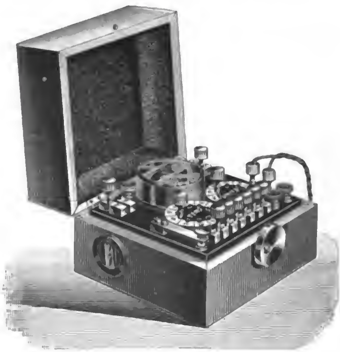


Fig. 37.

Für die Messung geringer Isolationswiderstände sind die Anordnungen noch kompendiöser und gewöhnlich in einem leicht transportirbaren Kasten vereinigt. Fig. 37 zeigt einen Messapparat der Silvertown Company. Für die Bestimmung von Isolationswiderständen nach der Methode des direkten Ausschlags wird die Batterie an den rechtsseitigen mit „Isolation“ bezeichneten Stöpselkontakt angeschlossen, an die hintere linke, gleichfalls mit „Isolation“ bezeichnete Klemme wird das Kabel resp. das Leitungsnetz, an die rechte die Erdleitung gelegt. Zu dem Instrument gehört eine tragbare Batterie von 30 Elementen, bei deren Anwendung das Galvanometer für einen Widerstand von 30 Megohm 1 Grad Ausschlag liefert. Der Apparat ist zugleich auch als Wheatstone-Brücke zu benutzen.

Eine fernere Methode, Isolationswiderstände zu messen, wenn ein hoher Grad von Genauigkeit nicht verlangt wird, ist die mittels des „Ohmmeters“ (Fig. 38), eines Apparates, der in der Hauptsache aus einem eigenthümlich konstruirten Galvanometer besteht. Das Instrument in der Form, wie es die Firma Evershed & Vignoles herstellt, enthält zwei rechtwinklig zu einander stehende Spulenpaare, deren resultirendes Feld auf eine Nadel wirkt, die auf einer



Fig. 38.

Spitze schwebt. Die Ablenkungen werden durch einen Zeiger vergrössert und sind auf einer direkt in Ohm getheilten Skala abzulesen. Das eine Spulenpaar ist in Reihe mit dem zu messenden Widerstand geschaltet, das andere bildet einen Nebenschluss zu ihm. Bei dieser Anordnung hängen die Ablenkungen der Nadel nur von dem Widerstand zwischen den Klemmen des Instruments ab. Als Stromquelle gehört zu dem Apparat eine Magnetmaschine, die einen Strom von ziemlich hoher Spannung liefert. Die Maschine ist, um magnetische Beeinflussungen der Galvanometernadel zu verhindern, in einigem Abstand von dem Instrument aufzustellen. Bei einer

Messspannung von 200 Volt lassen sich Widerstände von 10000 Ohm bis 10 Megohm messen. In einer neueren Ausführung des Ohmmeter besteht die Nadel aus weichem Eisen, so dass sie durch das entstehende Feld erst magnetisirt wird. Der Nullpunkt ist dann in der Mitte der Skala angeordnet, und die Genauigkeit der Messung wird erhöht dadurch, dass man durch Drehung des Generators nach links und rechts die Ausschläge nach beiden Seiten beobachtet, aus denen dann das Mittel zu nehmen ist.

Zweites Kapitel.

Isolationsmessungen an Niederspannungsnetzen während des Betriebs.

17. Die Methode des direkten Ausschlags zur Bestimmung von Isolationswiderständen in den Formen und Modifikationen, wie sie im vorigen Kapitel beschrieben wurden, bleibt in der Regel in ihrer Anwendung beschränkt einerseits auf Messungen an einzelnen Kabeln in der Fabrik, andererseits auf die Ermittelung des Isolationswiderstandes nicht allzu grosser Kabelnetze während und nach der Verlegung. Wird das Netz einigermassen ausgedehnt und umfangreich, so sinkt der Isolationswiderstand auf einen so kleinen Werth, dass man sich dann zweckmässig anderer Methoden bedient. Zudem ist es wünschenswerth und erforderlich, während des Betriebes bequem und ohne grossen Aufwand an Apparaten Isolationsmessungen ausführen zu können und sich für dieselben der Betriebsspannung selbst zu bedienen.

Der Verband deutscher Elektrotechniker hat in seinen Sicherheitsvorschriften für elektrische Starkstromanlagen die an die Isolation einer Niederspannungsanlage und deren Messung zu stellenden Bedingungen folgendermassen formulirt[1]).

a) Der Isolationswiderstand des ganzen Leitungsnetzes gegen Erde muss mindestens $\frac{1\,000\,000}{n}$ Ohm betragen[2]). Ausserdem muss für jede Hauptabzweigung die Isolation mindestens $10\,000 + \frac{1\,000\,000}{n}$ Ohm betragen.

---

[1]) Siehe § 17 der Vorschr.

[2]) Für Mittelspannungen (250—1000 Volt) wird ein Isolationswiderstand von $\frac{3\,000\,000}{n}$ Ohm verlangt.

In diesen Formeln ist unter *n* die Zahl der an die betreffende Leitung angeschlossenen Glühlampen zu verstehen, einschliesslich eines Aequivalents von 10 Glühlampen für jede Bogenlampe, jeden Elektromotor oder anderen stromverbrauchenden Apparat.

b) Bei Messungen von Neuanlagen muss nicht nur die Isolation zwischen den Leitungen und der Erde, sondern auch die Isolation je zweier Leitungen verschiedenen Potentials gegen einander gemessen werden; hierbei müssen alle Glühlampen, Bogenlampen, Motoren oder andere stromverbrauchende Apparate von ihren Leitungen abgetrennt, dagegen alle vorhandenen Beleuchtungskörper angeschlossen, alle Sicherungen eingesetzt und alle Schalter geschlossen sein. Dabei müssen die Isolationswiderstände den obigen Formeln genügen.

c) Bei der Messung der Isolation sind folgende Bedingungen zu beachten. Bei Isolationsmessung durch Gleichstrom gegen Erde soll, wenn möglich, der negative Pol der Stromquelle an die zu messende Leitung gelegt werden, und die Messung soll erst erfolgen, nachdem die Leitung während einer Minute der Spannung ausgesetzt war. Alle Isolationsmessungen müssen mit der Betriebsspannung gemacht werden. Bei Mehrleiteranlagen ist unter Betriebsspannung die einfache Lampenspannung zu verstehen[1]).

Die unter c) aufgestellte Forderung, die Messung erst vorzunehmen, wenn die Leitung 1 Minute der Spannung ausgesetzt war, ist begründet in der früher bereits erörterten Abhängigkeit des Isolationswiderstandes von der Zeit der Elektrisirung und der Nothwendigkeit, behufs Festlegung eines wohl definirten Werthes des Isolationswiderstands eine bestimmte Zeit der Elektrisirung zu Grunde zu legen.

Im Interesse der Sicherheit des Betriebes sollte der Isolationswiderstand eines Leitungsnetzes in kurzen Zwischenräumen, am besten täglich einmal, gemessen und die einzelnen Messungsergebnisse sorgfältig protokollirt werden. Eine Aenderung in den Ablesungen der Instrumente — nur diese brauchten notirt zu werden — kündigt dann sofort auch eine Aenderung des Isolationszustandes an, die Ursache der Abnahme ist zu ermitteln und, wenn möglich, zu beseitigen, ehe ein wirklicher Fehler eingetreten ist.

---

[1]) Näheres vergl. bei C. L. Weber, Erläuterungen zu den Sicherheits-Vorschriften des V. D. E. (Berlin und München, Julius Springer und R. Oldenbourg) 3. Ausgabe, 1900.

18. In roher Weise ist eine Prüfung der Isolation möglich durch die sogenannten Erdschlussprüfer (ground detectors), wie sie in Amerika vielfach in Gebrauch sind. Diese Anordnungen ergeben keine quantitativen Resultate, sondern treten überhaupt erst in Funktion, wenn der Isolationsfehler eine beträchtliche Grösse erreicht hat.

Ein sehr einfacher derartiger Erdschlussprüfer ist in Fig. 39 in Verbindung mit einer Dreileiteranlage dargestellt. Eine Glühlampe wird mittels eines Umschalters zwischen je eine der zu prüfenden Leitungen und Erde geschaltet. Aus dem mehr oder weniger hellen Glühen der Lampe lässt sich auf die Güte der Isolation schliessen.

Unterschiede in dem Isolationszustande zweier Leitungen desselben Netzes zeigt die Anordnung Fig. 40 an. Das Princip dieses Systems und einer Reihe ähnlicher besteht darin, dass eine Anzahl

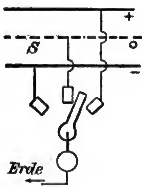


Fig. 39.

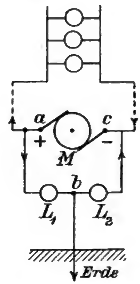


Fig. 40.

von Lampen hintereinandergeschaltet zwischen die Pole des Netzes gelegt ist, während die Mitte der Lampenreihe dauernd an Erde liegt. Tritt etwa in der positiven Leitung ein Isolationsfehler auf, so brennen die auf der Seite dieser Leitung gelegenen Lampen nicht so hell als die andere Hälfte, und umgekehrt. Einen Rückschluss auf die Grösse des Fehlers lässt ein solcher Erdschlusszeiger natürlich nicht zu. Ersetzt man die Lampen durch 2 hintereinander zwischen die Pole geschaltete Voltmeter, deren Mitte geerdet ist, so ist zwar der Grössenunterschied in dem Fehlerwiderstande beider Leitungen zu erkennen, jedoch leidet die Methode immer noch an dem wesentlichen Mangel, dass bei gleichzeitigem gleich starken Isolationsfehler beider Leitungen ein Unterschied in der Anzeige bei-

der Instrumente überhaupt nicht vorhanden ist, so dass in diesem Falle die Anordnung gänzlich versagt. Dasselbe tritt ein, wenn in Dreileiteranlagen der Mittelleiter dauernd geerdet ist.

19. Eine Methode zur Messung starker Isolationsfehler an einem Leiter unter der Voraussetzung, dass die Fehlerwiderstände der anderen Leiter verhältnissmässig gross sind, hat Kallmann angegeben[1]). In Fig. 41 ist angenommen, dass der Fehler vom Widerstande W im neutralen Leiter liegt. An die positive oder negative Leitung des Dreileiternetzes wird über einen regulirbaren Vorschaltwiderstand ϱ ein Ampèremeter A angeschlossen, dessen andere Klemme zu dem Kontakthebel des Umschalters I/II führt. Knopf I desselben ist mit dem Mittelleiter, der natürlich nicht ständig an Erde liegen darf, Knopf II mit der Erde verbunden. Wenn der

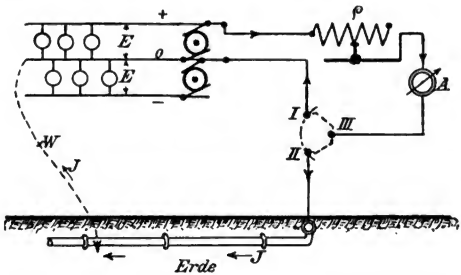


Fig. 41.

Fehler in einem der äusseren Leiter liegt, so müssen ϱ und A zwischen die mittlere Schiene und III geschaltet werden, während der fehlerhafte Leiter mit I verbunden wird. Bei der Stellung I ist die am Ampèremeter abgelesene Stromstärke, wenn E die Betriebsspannung ist,

$$J_1 = \frac{E}{\varrho}.$$

Bei der Stellung II kommt zu ϱ die Grösse des Fehlerwiderstands W hinzu, und man erhält

$$J_2 = \frac{E}{\varrho + W}.$$

---

[1]) Kallmann, E. T. Z. 1893, S. 545.

Aus beiden Gleichungen folgt:

$$W = E\left\{\frac{1}{J_2} - \frac{1}{J_1}\right\}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (17)$$

Nach dieser Methode ist es möglich, angenäherte Werthe für den Isolationswiderstand zu erhalten, wenn derselbe etwa von der gleichen Grössenordnung ist wie ϱ, so dass die Stärke des Erdstromes J_2 beträchtlich wird.

20. Methode von Frisch. Ein Ampèremeter oder Voltmeter, das Ablesungen auf beiden Seiten vom Nullpunkte zulässt, wird mit einer Klemme an Erde gelegt, während die andere abwechselnd mit je einem Leiter des Netzes verbunden wird.

Sind d_1 und d_2 die Ablesungen, die man bei Anlegen des Instruments an zwei benachbarte Leiter des Netzes erhält — z. B. Mittelleiter und einen der Aussenleiter im Falle eines Dreileitersystems —, ist ferner V die Spannung zwischen diesen Leitern in Volt — die Betriebsspannung — und g der innere Widerstand des benutzten Instruments in Ohm, so ist der Isolationswiderstand des ganzen Netzes in Ohm durch die einfache Formel ausgedrückt

$$F = \frac{V}{d_1 - d_2} - g, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (18)$$

wenn man zur Messung sich eines Ampèremeters bedient;

$$F = g\left\{\frac{V}{d_1 - d_2} - 1\right\}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (19)$$

wenn man ein Voltmeter verwendet.

d_1 und d_2 sind mit Berücksichtigung ihres Vorzeichens in diese Formeln einzuführen.

Die oben aufgestellte Forderung, für die Ausführung der Methode ein Instrument mit einer Skala zu benutzen, welche Ausschläge auf beiden Seiten vom Nullpunkt aus abzulesen gestattet, ist nicht absolut unerlässlich, wenngleich die Anwendung eines solchen Instrumentes bequem ist. Ergeben z. B. die drei Leiter eines Dreileiternetzes die Ausschläge d_1, d_2, d_3, so besteht zwischen diesen Werthen die Gleichung:

$$d_1 - d_2 = d_2 - d_3.$$

Aus dieser Beziehung kann man aber leicht erkennen, welches Vorzeichen man gegebenenfalls einer Ablenkung beizulegen hat. Bei

einem Zweileiternetz gehen die beiden Ausschläge stets nach der entgegengesetzten Seite, ihre Beträge müssen somit addirt werden.

Es sollen nun zunächst die beiden Formeln (18) und (19) in möglichst allgemeiner Weise rechnerisch hergeleitet und im Anschluss daran einige weitere Beziehungen gewonnen werden, die für die folgenden Betrachtungen wichtig sind.

Wir wollen vorläufig die beiden speciellen Fälle eines Zweileiter- und Dreileitersystems behandeln.

a) Zweileitersystem. In Fig. 42 bedeutet V die zwischen den Leitern I und II herrschende Betriebsspannung, P_1, P_2 sind

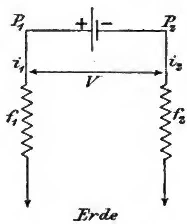


Fig. 42.

die Spannungen der beiden Pole gegen Erde, f_1, f_2 die Fehlerwiderstände der Leiter I und II, i_1 und i_2 die Intensität der durch die Isolation zur Erde fliessenden Ströme.

Aus den Kirchhof'schen Gesetzen ergiebt sich:

$$i_1 + i_2 = 0 \quad \ldots \ldots \ldots \quad (20)$$

$$i_1 f_1 - i_2 f_2 = V \quad \ldots \ldots \ldots \quad (21)$$

Durch Elimination von i_1 geht die zweite Gleichung über in

$$- i_1 f_1 - i_2 f_2 = V$$

oder

$$i_2 = - \frac{V}{f_1 + f_2}. \quad \ldots \ldots \ldots \quad (22)$$

Nun ist

$$P_2 = i_2 f_2 = - \frac{V f_2}{f_1 + f_2} = - \frac{V \frac{1}{f_1}}{\frac{1}{F}}, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (23)$$

wenn $\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$ gesetzt wird. $\frac{1}{F}$ ist die Grösse der gesammten Fehlerleitung, F der Isolationswiderstand des ganzen Systems.

In ähnlicher Weise ergiebt sich

$$P_1 = \frac{V\frac{1}{f_2}}{\frac{1}{F}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (24)$$

Wird nun ein Voltmeter mit dem Widerstande g zwischen den positiven Pol und Erde geschaltet, so erscheint der Voltmeterwiderstand g zum Fehlerwiderstand parallel geschaltet, es ist also anstatt $\frac{1}{f_1}$ einzusetzen $\frac{1}{f_1} + \frac{1}{g}$. Dadurch nimmt der Ausdruck für die Spannung des positiven Pols gegen Erde die Form an:

$$P_1' = \frac{V\frac{1}{f_2}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (24\,a)$$

Wird das Instrument zwischen negativen Pol und Erde gelegt, so erhält man entsprechend:

$$P_2' = -\frac{V\frac{1}{f_1}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (23\,a)$$

Durch Subtraktion beider Gleichungen erhält man:

$$P_1' - P_2' = \frac{V\frac{1}{F}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (25)$$

oder

$$1 + \frac{F}{g} = \frac{V}{P_1' - P_2'}$$

$$F = g\left(\frac{V}{P_1' - P_2'} - 1\right) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (26)$$

Da nun die Ausschläge des Instruments d_1 und d_2 direkt die Spannung in Volt gegen Erde angeben, so kann man diese für P_1' und P_2' einsetzen. Dann folgt:

$$F = g\left(\frac{V}{d_1 - d_2} - 1\right). \quad \ldots \ldots \quad (27)$$

Diese Formel ist identisch mit Gleichung 19. Gleichung 19 ist damit für Zweileitersysteme bewiesen.

Benutzt man anstatt eines Voltmeters ein Ampèremeter mit dem inneren Widerstand g, so ist der Ausschlag d_1, falls das Instrument zwischen positivem Leiter und Erde eingeschaltet ist:

$$d_1 = \frac{V}{g} \frac{\frac{1}{f_1}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}}. \quad \ldots \ldots \quad (24\,b)$$

Im anderen Falle:

$$d_2 = -\frac{V}{g} \frac{\frac{1}{f_2}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}}. \quad \ldots \ldots \quad (23\,b)$$

Durch Subtraktion dieser Gleichungen von einander ergiebt sich:

$$d_1 - d_2 = \frac{V}{g} \frac{\frac{1}{F}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}} \quad \ldots \ldots \quad (28)$$

oder:

$$d_1 - d_2 = \frac{V}{g} \frac{1}{1 + \frac{F}{g}}$$

Schliesslich:

$$F = \frac{V}{d_1 - d_2} - g. \quad \ldots \ldots \quad (29)$$

Damit ist auch Gleichung 18 bewiesen.

Eliminirt man aus (23a) und (24a) mit Hülfe von (26) die Grösse F, so erhält man für die Fehlerwiderstände der einzelnen Leitungen f_1 und f_2 bei Anwendung eines Voltmeters die Ausdrücke:

$$f_1 = g \frac{\{V - (d_1 - d_2)\}}{-d_2} \quad \ldots \ldots \quad (30)$$

$$f_2 = g \frac{\{V - (d_1 - d_2)\}}{d_1} \quad \ldots \ldots \quad (31)$$

Bei Benutzung eines Ampèremeters lassen sich die Fehlerwiderstände der einzelnen Leitungen durch die Ausschläge dieses Instruments ausdrücken mit Hülfe der aus den Gleichungen (23b), (24b) und (29) zu gewinnenden Formeln:

$$f_1 = \frac{V - g(d_1 - d_2)}{-d_2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (32)$$

$$f_2 = \frac{V - g(d_1 - d_2)}{d_1} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (33)$$

Der Ausdruck $d_1 - d_2$ in den Formeln bedeutet die algebraische Differenz der Ablesungen, d. h., wenn die Ablenkungen nach entgegengesetzten Seiten erfolgt sind, so sind ihre Werthe zu addiren.

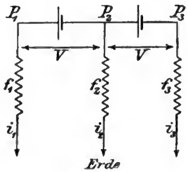


Fig. 43.

Die Fehlerwiderstände der positiven resp. negativen Leitung sind in einem Zweileitersystem — sowohl bei Anwendung eines Voltmeters wie eines Ampèremeters — den bei Einschaltung des Instruments zwischen negativen resp. positiven Pol und Erde erhaltenen Ausschlägen umgekehrt proportional. Beim Auftreten eines Fehlers ist also sofort zu ermitteln, in welcher Leitung sich derselbe befindet.

b) Dreileitersystem. Fig. 43 stellt die Verhältnisse in einem Dreileitersystem dar. Die Spannungsdifferenz zwischen je zwei Leitern (Betriebsspannung) sei V, die Spannungsdifferenzen der einzelnen Leiter gegen Erde seien P_1, P_2, P_3, so dass

$$P_1 - P_2 = P_2 - P_3 = V$$

ist.

Die Fehlerwiderstände der drei Leitungen mögen wieder mit f_1, f_2, f_3, die durch diese zur Erde fliessenden Ströme mit i_1, i_2, i_3 bezeichnet werden.

Dann liefert die Anwendung des Kirchhof'schen Gesetzes die Gleichungen:

$$i_1 + i_2 + i_3 = O, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (34)$$

$$i_1 f_1 - i_2 f_2 = V, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (35)$$

$$i_2 f_2 - i_3 f_3 = V. \quad \ldots \ldots \ldots \quad (36)$$

Man multiplicire (35) mit f_3 und (36) mit f_1, dann folgt:

$$i_1 f_1 f_3 = V f_3 + i_2 f_2 f_3,$$

$$i_3 f_1 f_3 = V f_1 + i_2 f_2 f_1.$$

Berücksichtigt man, dass

$$i_2 = -(i_1 + i_3)$$

ist, so ergiebt sich durch Addition der beiden Gleichungen:

$$-i_2 f_1 f_3 = V(f_3 - f_1) + i_2 (f_2 f_3 + f_2 f_1)$$

oder

$$i_2 (f_2 f_3 + f_2 f_1 + f_1 f_3) = V(f_1 - f_3).$$

Nach Division durch $f_2 f_3$ folgt:

$$i_2 f_2 \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3}\right) = V\left(\frac{1}{f_3} - \frac{1}{f_1}\right)$$

$$i_2 f_2 = P_2 = \frac{\frac{1}{f_3} - \frac{1}{f_1}}{\frac{1}{F}} V \quad \ldots \quad (37)$$

wenn wir die Fehlerleitung des ganzen Netzes

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3}$$

einführen.

Es ergeben sich nun die Potentiale der Aussenleiter:

$$P_1 = P_2 + V = \left(\frac{\frac{1}{f_3} - \frac{1}{f_2}}{\frac{1}{F}} - 1\right) V \quad \ldots \quad (38)$$

$$P_3 = P_2 - V = \left(\frac{\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1}}{\frac{1}{F}} - 1\right) V \quad \ldots \quad (39)$$

Wird nun ein Voltmeter mit dem Widerstand g zwischen den einen Pol und Erde geschaltet, so ist sein Widerstand dem Fehlerwiderstand der entsprechenden Leiter parallel geschaltet; es ist also:

$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{g}$ zu setzen für $\frac{1}{f_1}$ in Gleichung 38,

$\frac{1}{f_2} + \frac{1}{g}$ - - - $\frac{1}{f_2}$ in Gleichung 37,

$\frac{1}{f_3} + \frac{1}{g}$ - - - $\frac{1}{f_3}$ in Gleichung 39.

Die Ausdrücke für die Spannungsdifferenzen der Pole gegen Erde werden dann:

$$P_1' = \left(\frac{\frac{1}{f_3} - \frac{1}{f_1} - \frac{1}{g}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}} + 1 \right) V \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (38\,a)$$

$$P_2' = \frac{\frac{1}{f_3} - \frac{1}{f_1}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}} V \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (37\,a)$$

Durch Subtraktion dieser beiden Gleichungen erhält man:

$$P_1' - P_2' = -V \left\{ \frac{1}{g\left(\frac{1}{F} + \frac{1}{g}\right)} - 1 \right\}$$

und nach einigen leichten Rechnungen:

$$F = g\left(\frac{V}{P_1' - P_2'} - 1\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (40)$$

P_1' und P_2' sind den Ausschlägen des Voltmeters d_1 und d_2 gleichzusetzen, so dass sich ergiebt:

$$F = g\left(\frac{V}{d_1 - d_2} - 1\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (41)$$

Damit ist Gleichung 19 auch für den Fall des Dreileitersystems bewiesen.

Einen Ausdruck derselben Form würde man natürlich erhalten haben, wenn man die Ausschläge zwischen negativem Aussenleiter und Mittelleiter zur Rechnung herangezogen hätte.

Wird ein Ampèremeter mit Widerstand g benutzt, so sind die Ausschläge desselben:

$$d_1 = \frac{P_1'}{g}$$

$$d_2 = \frac{P_2'}{g}$$

$$d_3 = \frac{P_3'}{g}.$$

Durch Einsetzen der Werthe für P_1' und P_2' erhält man:

$$d_1 = \frac{V}{g}\left\{\frac{\frac{1}{f_3} - \frac{1}{f_1} - \frac{1}{g}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}} + 1\right\} \quad \ldots\ldots \quad (42)$$

$$d_2 = \frac{V}{g}\left\{\frac{\frac{1}{f_3} - \frac{1}{f_1}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (43)$$

$$d_3 = \frac{V}{g}\left\{\frac{\frac{1}{f_3} - \frac{1}{f_1} + \frac{1}{g}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}} - 1\right\} \quad \ldots\ldots \quad (44)$$

Durch Subtraktion je zweier aufeinanderfolgender dieser Ausdrücke, etwa des ersten und zweiten, ergiebt sich:

$$d_1 - d_2 = \frac{V}{g}\left\{-\frac{\frac{1}{g}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}} + 1\right\}$$

$$= \frac{V}{g}\left\{\frac{1}{1 + \frac{F}{g}}\right\}$$

Daraus folgt:

$$F = g\left(\frac{V}{g}\,\frac{1}{d_1 - d_2} - 1\right)$$

$$F = \frac{V}{d_1 - d_2} - g. \quad \ldots\ldots \quad (45)$$

Damit ist auch Gleichung 18 abgeleitet.

Das für die Messungen zu benutzende Instrument soll im Allgemeinen einen möglichst niedrigen Widerstand haben, indessen hängt der günstigste Werth desselben bis zu einem gewissen Grade ab von dem normalen Isolationswiderstande des Netzes.

Der Einfluss des inneren Widerstands bei einem Voltmeter geht übrigens leicht aus der Formel $F = g\left(-1 + \frac{V}{d_1 - d_2}\right)$ hervor. Wenn g gegen F gross ist, muss der Klammernausdruck klein sein, d. h. $\frac{V}{d_1 - d_2}$ ist nicht viel grösser als eins; daher wird ein kleiner Ablesungsfehler schon einen erheblichen Fehler im Resultat hervorrufen.

21. In einem grossen Vertheilungsnetze, dessen normaler Isolationswiderstand nur wenige Ohm beträgt, würde ein Ampèremeter von sehr niedrigem Widerstande zu viel Strom verbrauchen, während ein Voltmeter einen zu hohen Widerstand hätte. In einem solchen Fall bestimmt man zweckmässig zunächst die maximale für die Prüfung zulässige Stromstärke, und benutzt dann ein bis zu dieser Stromstärke reichendes Ampèremeter eventuell noch mit vorgeschaltetem Widerstande. Derartige Widerstände stellt man sich aus starken Kupferdrähten oder Eisendrähten her. Der Querschnitt des Drahtes muss in Bezug auf zulässige Erwärmung der maximalen Stromstärke angepasst sein. Als Widerstand g ist dann die Summe aus dem Widerstand des Instruments und dem der vorgeschalteten Spule einzusetzen.

Bei Anlagen von etwas höherem Isolationswiderstand — etwa von 40 oder 50 Ohm aufwärts — sind grosse Stromstärken zwischen einem Leiter und Erde nicht mehr zu befürchten; man braucht daher dem Ampèremeter keinen Widerstand vorzuschalten, obwohl ein auf alle Fälle vorgeschalteter Widerstand von wenigen Ohm immerhin eine grössere Sicherheit bietet. Für noch höhere Isolationswiderstände nehmen die Prüfstromstärken immer mehr ab, und man muss Milliampèremeter oder -Voltmeter mit niederem Widerstande benutzen. Für Isolationsmessungen geeignete Instrumente der letzteren Art sind bisher wenig verbreitet. Hitzdrahtvoltmeter — etwa Cardew-Instrumente — haben zwar einen verhältnissmässig niedrigen Widerstand, sie werden auch direkte Fehler ohne Weiteres anzeigen; für genaue Messungen des Isolationswiderstandes sind sie indessen nicht zu verwenden, weil ihr Widerstand nicht konstant ist, sondern bei jeder Ablesung sich ändert. Elektromagnetische Voltmeter der üblichen Art, die in der Regel einen Widerstand von etwa 1000 Ohm haben, können mit Erfolg nur zur Prüfung solcher Anlagen dienen, deren Isolationswiderstand mindestens 100 Ohm beträgt. Wenn sie

für die Messung kleinerer Isolationswiderstände benutzt werden, so wird — wie aus den später angeführten Beispielen hervorgeht — schon ein geringer Ablesungsfehler am Instrument einen beträchtlichen Fehler in dem berechneten Werthe des Isolationswiderstandes bewirken. Beispielsweise würde in einem Netz von 50 Ohm Isolationswiderstand bei einer Betriebsspannung von 100 Volt ein Fehler von $1/2$ Volt in den Ablesungen im Resultat einen Fehler von etwa 10 % hervorrufen.

In kleinen Anlagen, deren Isolationswiderstände 1000 Ohm und mehr betragen, erhält man indessen mit einem gewöhnlichen elektromagnetischen Voltmeter sehr gute Resultate; in diesen Fällen kann man sich auch eines Galvanometers mit hohem Widerstande bedienen. Da ein solches nicht direkt Volt angiebt, so bestimmt man zunächst die Betriebsspannung mit demselben, ausgedrückt in Skalentheilen des Instruments, und macht dann die Ablesungen zwischen den Einzelleitern und Erde. Da nur das Verhältniss $\frac{V}{d_1 - d_2}$ in den zur Berechnung des Isolationswiderstandes dienenden Formeln auftritt, so ist eine Kenntniss des Faktors, der die Galvanometerausschläge auf Volt reducirt, nicht nöthig.

Von Ampèremetern, deren Nullpunkt sich in der Mitte der Skala befindet und deren Skalentheile von Null bis zur maximalen Stromstärke gleiche Abstände haben, sind zu nennen:

- Die Ayrton & Perry-Ampèremeter mit permanenten Magneten,
- die Weston-Ampèremeter und Milliampèremeter,
- die Ampèremeter und Milliampèremeter von Hartmann & Braun mit beweglicher Spule,
- die nach demselben Princip gebauten Ampèremeter und Milliampèremeter von Arnoux-Chauvin.

Die bereits abgeleiteten Gleichungen (42), (43), (44) können dazu dienen, Anhaltspunkte zur Auswahl eines für einen bestimmten Zweck besonders geeigneten Instruments zu geben.

Es war für eine Dreileiteranlage:

$$d_1 = \frac{V}{g}\left(\frac{\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1} - \frac{1}{g}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}} + 1\right) = \frac{V}{g}\left(\frac{\frac{1}{f_2} + \frac{2}{f_3}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}}\right) \quad . \quad . \quad (42a)$$

$$d_2 = \frac{V}{g}\left(\frac{\frac{1}{f_3} - \frac{1}{f_1}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}}\right) \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (43\,a)$$

$$d_3 = \frac{V}{g}\left(\frac{\frac{1}{f_3} - \frac{1}{f_1} + \frac{1}{g}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}} - 1\right) = -\frac{V}{g}\left(\frac{\frac{1}{f_2} + \frac{2}{f_1}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}}\right). \quad (44\,a)$$

für eine Zweileiteranlage:

$$d_1 = \frac{V}{g}\,\frac{\frac{1}{f_2}}{\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{g}} \quad \ldots \ldots \quad (23\,b)$$

$$d_2 = -\frac{V}{g}\,\frac{\frac{1}{f_1}}{\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{g}} \quad \ldots \ldots \quad (24\,b)$$

Aus diesen Gleichungen lassen sich die Einflüsse der verschiedenen Faktoren auf die Grösse der Ausschläge d_1, d_2, d_3 gut übersehen, und man kann, wenn der normale Isolationszustand des Netzes bekannt ist, die günstigsten Werthe von Widerstand und Empfindlichkeit des erforderlichen Instrumentes ungefähr mit Hülfe derselben bestimmen.

Eine sehr zweckmässige Anwendung der Methode besteht in der Einschaltung eines registrirenden Voltmeters zwischen einen oder besser je eines solchen zwischen beide Aussenleiter und Erde. Die kleinste Aenderung im Isolationswiderstande wird dann sofort nach ihrem Entstehen bemerkt und man kann gleichzeitig aus der Voltmeterkurve ersehen, ob die Veränderung plötzlich vor sich gegangen ist, d. h. ob ein Fehler ausgebrochen, oder ob eine allmähliche Abnahme des Isolationswiderstandes eingetreten ist. Hand in Hand mit der Beobachtung des registrirenden Instruments gehen dann noch tägliche einmal mit einem Voltmeter oder Ampèremeter vorgenommene Messungen nach der auseinandergesetzten Methode. Ist der Widerstand des registrirenden Voltmeters gross gegenüber dem Isolationswiderstande des Netzes, so kann dasselbe während der Messungen eingeschaltet bleiben. In allen Fällen ist eine Abschmelzsicherung zwischen Leiter und Instrument zu schalten.

Eine bei Dreileiteranlagen häufig angewandte Methode der Prüfung besteht darin, ein Voltmeter mit hohem Widerstande zwischen jeden der beiden Aussenleiter und Erde zu legen. Wenn die Angaben in beiden Fällen wenig verschieden sind, so sieht man dies als Beweis dafür an, dass die Leiter in gutem Isolationszustande sind. Giebt die eine Ablesung einen beträchtlich niedrigeren Werth an wie die andere, so wird der auf jener Seite liegende Aussenleiter als der Schuldige betrachtet, sind beide Ablesungen gleich, so sucht man einen Fehler im Mittelleiter.

Das Irrige und Unzulängliche dieser Methode geht unmittelbar aus den obigen Gleichungen und den nachstehenden Beispielen hervor. Sind — um den einen Fall herauszugreifen — die Ablenkungen d_1 und d_3 gleich, so ist nach (42a) und (44a)

$$\frac{1}{f_2} + \frac{2}{f_3} = \frac{1}{f_2} + \frac{2}{f_1} \dots .$$

d. h. $f_1 = f_3$ und demzufolge $d_2 = 0$.

Das Eintreten der genannten Erscheinung sagt also über den Isolationszustand des Mittelleiters nichts aus, sondern zeigt nur an, dass die Fehlerwiderstände der beiden Aussenleiter gleich sind.

22. Beispiel 1. Entwicklung eines Fehlers im Mittelleiter eines Dreileiternetzes.

$V = 105$ Volt $\qquad g = 1$ Ohm.

a Ablesungen bei norm. Zustand	*b*	*c*	*d*
Amp.	Amp.	Amp.	
Positiver Leiter $d_1 = +4{,}0$	$d_1 = +4{,}5$	$d_1 = +7{,}3$	$d_1 =$ aus der Skala +
Mittelleiter $d_2 = +0{,}25$	$d_2 = +0{,}25$	$d_2 = +0{,}25$	$d_2 = +0{,}15$ Amp.
Negativ. Leiter $d_3 = -3{,}5$	$d_3 = -4{,}0$	$d_3 = -6{,}9$	$d_3 =$ aus der Skala −
$F = \frac{V}{d_1 - d_2} - g = \frac{V}{d_2 - d_3} - g = \frac{105}{3{,}75} - 1 = 27$ Ohm	$F = 24$ Ohm	$F = 13{,}8$ Ohm	$F = \sim 2$ Ohm

Beispiel 2. Entwicklung eines Fehlers im positiven Leiter desselben Netzes.

$V = 105$ Volt $\qquad g = 1$ Ohm

a Ablesungen bei normalem Zustand	*b*	*c*
Amp.	Amp.	
Positiver Leiter $d_1 = + 4{,}0$	$d_1 = + \ 3{,}8$	$d_1 = + 2{,}7$ Amp.
Mittelleiter $d_2 = + 0{,}25$	$d_2 = - \ 3{,}7$	$d_2 =$ aus der Skala —
Aussenleiter $d_3 = - 3{,}5$	$d_3 = - 11{,}1$	$d_3 =$ aus der Skala —
$F = 27$ Ohm	$F = 13$ Ohm	$F = \sim 2$ Ohm

Beispiel 3. Beginnender Fehler im negativen Leiter desselben Netzes.

$V = 105$ Volt $\qquad g = 1$ Ohm

a Ablesungen bei normalem Zustand	*b*
Amp.	Amp.
Positiver Leiter $d_1 = + 4{,}0$	$d_1 = + 4{,}6$
Mittelleiter $d_2 = + 0{,}25$	$d_2 = + 0{,}6$
Negativer Leiter $d_3 = - 3{,}5$	$d_3 = - 3{,}5$
$F = 27$ Ohm	$F = 25$ Ohm

Zu den beiden folgenden Beispielen sind absichtlich extreme Fälle gewählt, um zu zeigen, wie unvortheilhaft die Anwendung eines Voltmeters für die Prüfung ist, wenn der Isolationswiderstand des Netzes niedrig ist. Aus den Zahlen ist leicht zu ersehen, welche erhebliche Aenderung im Resultate schon geringe Ablesungsfehler hervorzubringen vermögen.

Beispiel 4. Beginnender Fehler im Mittelleiter.

$V = 110$ Volt $\qquad g = 1000$ Ohm

a Ablesungen bei normalem Zustand	*b*
Volt	Volt
Positiver Leiter $d_1 = + 111{,}3$	$d_1 = + 111{,}1$
Mittelleiter $d_2 = + \ 6{,}7$	$d_2 = + \ 5{,}7$
Negativer Leiter $d_3 = - \ 98{,}0$	$d_5 = - \ 99{,}8$
$F = g\left(\frac{V}{d_1 - d_2} - 1\right) = g\left(\frac{V}{d_2 - d_3} - 1\right)$	$F = 43$ Ohm
$= 1000\left(\frac{110}{104{,}6} - 1\right) = 52$ Ohm	

Beispiel 5. Beginnender Fehler im negativen Leiter desselben Netzes.

$V = 110$ Volt $\qquad g = 1000$ Ohm

a Normale Ablesungen		*b*
	Volt	Volt
Positiver Leiter	$d_1 = + 111,3$	$d_1 = + 128$
Mittelleiter	$d_2 = + 6,7$	$d_2 = + 23$
Negativer Leiter	$d_3 = - 98,0$	$d_3 = - 83$
	$F = 52$ Ohm	$F = 1000\left(\frac{110}{105,5} - 1\right) = 43$ Ohm

23. Isolationsprüfer der Weston Company. Das Instrument ist gegründet auf die im Vorhergehenden beschriebene Methode und dient dazu, den Isolationszustand eines Zweileiternetzes zu messen. Er besteht aus einem Voltmeter von etwa 30000 Ohm Widerstand, dessen Skala den Nullpunkt in der Mitte hat. Die Skala ist über ihren ganzen Bereich gleichmässig getheilt. Der positive und negative Leiter des Netzes werden mit den beiden Klemmen + und — verbunden, während eine dritte auf der Figur nicht sichtbare Klemme an Erde gelegt wird. Mit dieser letzteren ist ein Pol des Voltmeters dauernd verbunden. Drückt man den linksseitig gelegenen Knopf herunter, so hat der zweite Pol des Voltmeters mit dem positiven Leiter Kontakt, drückt man den Knopf rechts, so ist der negative Leiter des Netzes an das Voltmeter angeschlossen. Die Art der Verbindung ist aus Fig. 44 ersichtlich. Die Anordnung ist so getroffen, dass es unmöglich ist, zu gleicher Zeit beide Kontakte herabzudrücken und dadurch einen Kurzschluss herbeizuführen.

Die beiden Ablesungen am Instrument sind umgekehrt proportional den Fehlerwiderständen der beiden Leiter. Der absolute Werth des Fehlerwiderstandes ergiebt sich aus den bereits hergeleiteten Formeln:

$$f_1 = \frac{g\left\{V - (d_1 - d_2)\right\}}{-d_2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (30)$$

für den positiven Leiter,

$$f_2 = \frac{g\left\{V - (d_1 - d_2)\right\}}{d_1} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (31)$$

für den negativen Leiter.

Unter dem Ausdruck $d_1 - d_2$ ist die algebraische Differenz der beiden Ablesungen zu verstehen. Da also d_1 und d_2 stets auf verschiedenem Leiter des Nullpunkts liegen, so muss man die beiden Ablenkungen addiren, um die Grösse $d_1 - d_2$ zu erhalten; werden die absoluten Werthe der Ausschläge mit α_1, α_2 bezeichnet, so ist demnach $d_1 - d_2 = \alpha_1 + \alpha_2$ in die Formeln einzusetzen. Um die Umrechnung der Ausschläge nach den angegebenen Formeln zu ersparen, hat Herr A. O. Heinrich von der Weston Electrical In-

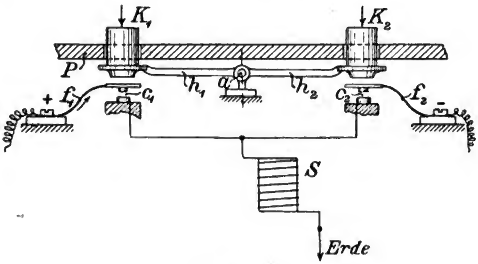


Fig. 44.

strument Company eine graphische Methode zur Bestimmung der absoluten Werthe des Isolationswiderstandes aus den Ausschlägen des Instruments angegeben:

In einem rechtwinkligen Koordinatensystem (Fig. 45) ist auf der Abscissenachse eine Voltskala $a \,..\, h$, auf der Ordinatenachse eine Ohmskala $h \,..\, k$ aufgetragen. Man zieht nun eine Parellele zur Abscissenachse $b\,b$ in einem solchen Abstand von a, dass $a\,b$ gleich dem Voltmeterwiderstande ist. Nun bildet man sich $V - (\alpha_1 + \alpha_2)$ und trägt den Werth dieser Grösse in Volt von a aus auf der Abscissenachse auf. Die abgetheilte Strecke sei $a\,c$. In a ist ein Faden f befestigt, diesen spannt man so, dass er bei der Abscisse $a\,e = \alpha_1$ die Linie, welche den Voltmeterwiderstand angab, schneidet, dann giebt die Strecke $c\,d$ den Werth des gesuchten Isolationswiderstandes an. Der Beweis ergiebt sich leicht aus der Figur. Aus der Aehnlichkeit der Dreiecke $a\,e\,b$ und $a\,c\,d$ folgt:

$$\frac{c\,d}{e\,b} = \frac{a\,c}{a\,e}.$$

Setzt man die Werthe für die einzelnen Grössen ein, so erhält man

$$c\,d = g\,\frac{V - (\alpha_1 + \alpha_2)}{\alpha_1}\,.$$

Die rechte Seite dieser Gleichung ist aber identisch mit dem aus Gleichung 31 sich ergebenden Werthe für f_2.

In Folge des hohen inneren Widerstandes, den das Instrument besitzt, wird die Bestimmung der Fehlerwiderstände der einzelnen Leiter nur für Netze mit einigermassen grossem Isolationswiderstande — 1000 Ohm und darüber — genau. In Anlagen von geringerem Isolationswiderstande wird der Ausdruck $\alpha_1 + \alpha_2$ so nahe gleich V,

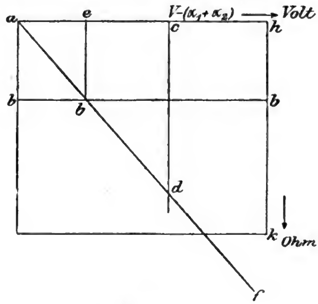


Fig. 45.

dass die Differenz beider Grössen nur mit einem geringen Grade von Genauigkeit zu erhalten ist. Die beiden Ablenkungen sind indessen — unabhängig von dem Widerstand des Instruments — den Fehlerwiderständen der beiden Leiter reciprok proportional, der Ausschlag bei Einschaltung des positiven Leiters dem Isolationswiderstande des negativen Leiters und umgekehrt. Das Instrument ist ähnlich den anderen Instrumenten der Weston Comp. nach dem Princip Deprez-d'Arsonval gebaut. Der Widerstand der beweglichen Spule beträgt nur wenige Ohm; der hohe innere Widerstand ist durch einen mit ihr in Reihe geschalteten Vorschaltwiderstand erzielt. Es würde sich als zweckmässiger erweisen, diesen Widerstand durch zwei kleinere Widerstände zu ersetzen, einen in Serie mit, den anderen parallel zu der beweglichen Spule, so dass der

gesammte Widerstand sich in seiner Grösse mehr dem zu messenden Widerstande nähert. Das Instrument könnte dann mit Vortheil auch in Anlagen mit mässig hohem Isolationswiderstande, — etwa von 50—100 Ohm aufwärts — verwandt werden und in Dreileiter- ebensowohl wie in Zweileiternetzen.

Der Isolationswiderstand des gesammten Netzes ist natürlich ebenfalls nach Formel 19 zu bestimmen:

$$F = g\left(\frac{V}{\alpha_1 + \alpha_2} - 1\right). \qquad (19)$$

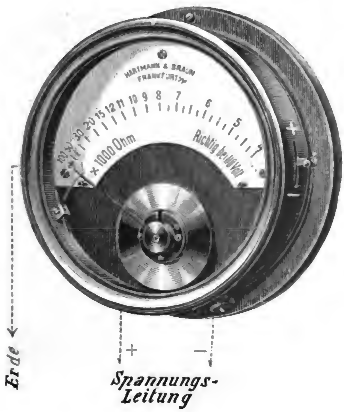


Fig. 46.

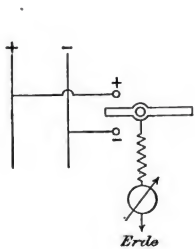


Fig. 47.

24. Isolationsmesser von Hartmann & Braun und Siemens & Halske. Derselbe ist zum Gebrauch in Zweileiteranlagen von hohem Isolationswiderstande bestimmt. Fig. 46 zeigt eine Ansicht des Instruments, Fig. 47 die inneren Verbindungen. Der rechts sichtbare Hebel wird zunächst auf + gestellt, wodurch das einpolig geerdete Instrument mit seinem anderen Pole auf die positive Leitung geschaltet ist, dann auf —. Wird nur in einer Lage eine Ablenkung erhalten, so ist der Ausschlag gleich dem Fehlerwiderstande des anderen Leiters. Steht beispielsweise der Zeiger bei der +-Stellung des Hebels auf 5 Megohm ein und bleibt anderseits bei der —-Stellung in seiner

Ruhelage ∞, so ist der Fehlerwiderstand des negativen Leiters 5 Megohm, der des positiven im Vergleich dazu sehr hoch.

Erhält man in beiden Lagen des Umschalters Ablenkungen, so berechnen sich die Fehlerwiderstände der einzelnen Leitungen aus den Formeln:

$$f_1 = d_2 - \frac{d_2 + g}{d_1 + g} g \quad \ldots\ldots \quad (46)$$

für den positiven Leiter,

$$f_2 = d_1 - \frac{d_1 + g}{d_2 + g} g \quad \ldots\ldots \quad (47)$$

für den negativen Leiter.

Hierbei sind d_1 und d_2 die Ablenkungen, g der Widerstand des Instruments. Der Isolationsmesser wird gebaut für Spannungen von

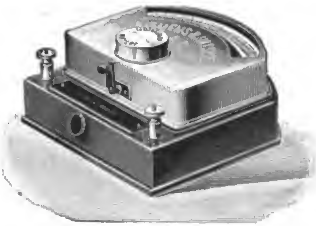


Fig. 48.

65 Volt aufwärts. Die Instrumente für 110 Volt haben einen Widerstand von etwa 1000 Ohm und einen Skalenbereich von 100000 Ohm bis 4000 Ohm.

Fig. 48 zeigt einen Isolationsmesser der Firma Siemens & Halske mit verstellbarem magnetischen Nebenschluss (vgl. auch S. 27). Das Instrument ist als Voltmeter mit hohem inneren Widerstand (30000 Ohm) gebaut, und besitzt eine Voltskala bis 150 Volt, gleichzeitig ist es auch mit einer Theilung versehen, die den Werth des Isolationswiderstandes in Ohm für eine bestimmte Spannung, etwa 110 Volt, direkt angiebt. Durch Drehen des den magnetischen Nebenschluss bethätigenden Hebels zwischen den Klemmen ist es möglich, die Empfindlichkeit um $\pm 5\,\%$ zu ändern. Die Anbringung des magnetischen Nebenschlusses hat den Zweck, die Isolation direkt ablesen zu können, auch wenn die Spannung nicht genau 110 Volt beträgt, welcher Werth der Aichung zu Grunde gelegt ist. Zu dem

Ende stellt man den Nebenschluss so ein, dass der Zeiger auf 110 Volt steht, wenn diese Spannung an die Klemmen des Instruments gelegt ist, und kann dann zur Isolationsmessung an der Widerstandsskala direkt den Isolationswiderstand in Ohm ablesen.

25. Methode von Frölich. Ein Voltmeter oder Milliampèremeter, dessen Widerstand hoch ist, verglichen mit dem zu messenden Isolationswiderstande, und das nach beiden Seiten vom Nullpunkt aus Ablenkungen zulässt, oder irgend ein Galvanometer mit hohem Widerstande, dessen Ausschläge der Stromstärke proportional sind, das indessen nicht direkt zeigend zu sein braucht, wird zwischen einen Leiter des Netzes und Erde geschaltet (Fig. 49). Man erhalte eine



Fig. 49.

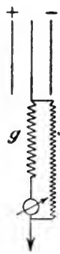


Fig. 50.

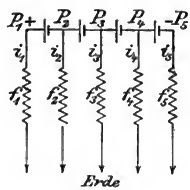


Fig. 51.

Ablenkung d_1, nun wird dem Instrument parallel ein regulirbarer Nebenschluss s gelegt (Fig. 50), und dieser so eingestellt, dass die neue Ablenkung d_2 gleich der Hälfte von d_1 ist. Dann ist s gleich dem Isolationswiderstande des Netzes.

Wir wollen nunmehr zunächst die allgemeinen Beziehungen für die der Methode zu Grunde liegende Schaltung herleiten. Der Allgemeinheit wegen sollen die Verhältnisse auf ein Fünfleiternetz bezogen werden. Die erhaltenen Formeln gelten ebenso für ein Zwei- und Dreileiternetz, allgemein für ein n-Leiternetz.

In einem Fünfleitersystem (Fig. 51) gelten in Folge der Kirchhof'schen Gesetze folgende Gleichungen ($P_1 \ldots P_5$, $i_1 \ldots i_5$, $f_1 \ldots f_5$ bedeuten die Potentiale der einzelnen Leiter gegen Erde, die in ihnen herrschenden Stromstärken, ihre Fehlerwiderstände, V ist die Spannung zwischen zwei Leitern).

$$\begin{aligned} i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5 &= O \quad (a) \\ i_1 f_1 - i_2 f_2 &= V \quad (b) \\ i_2 f_2 - i_3 f_3 &= V \quad (c) \\ i_3 f_3 - i_4 f_4 &= V \quad (d) \\ i_4 f_4 - i_5 f_5 &= V \quad (e) \end{aligned} \quad \ldots\ldots \quad (48)$$

Aus (b) und (c) sowie aus (d) und (e) folgen:

$$\begin{aligned} i_1 f_1 &= 2V + i_3 f_3 \quad (f) \\ i_5 f_5 &= -2V + i_3 f_3 \quad (g) \end{aligned} \quad \ldots\ldots \quad (49)$$

Nun multiplicire man (f) mit $f_2 f_4 f_5$, (c) mit $f_1 f_4 f_5$, (d) mit $f_1 f_2 f_5$ und (g) mit $f_1 f_2 f_4$. Dann entstehen die Gleichungen:

$$\begin{aligned} i_1 f_1 f_2 f_4 f_5 &= 2V f_2 f_4 f_5 + i_3 f_3 f_2 f_4 f_5 \\ i_2 f_1 f_2 f_4 f_5 &= V f_1 f_4 f_5 + i_3 f_3 f_1 f_4 f_5 \\ i_4 f_1 f_2 f_4 f_5 &= - V f_1 f_2 f_5 + i_3 f_3 f_1 f_2 f_5 \\ i_5 f_1 f_2 f_4 f_5 &= -2V f_1 f_2 f_4 + i_3 f_3 f_1 f_2 f_4. \end{aligned} \quad \ldots \quad (50)$$

Durch Addition derselben und Berücksichtigung von (a) folgt:

$$\begin{aligned} - i_3 f_1 f_2 f_4 f_5 = V & (2 f_2 f_4 f_5 + f_1 f_4 f_5 - f_1 f_2 f_5 - 2 f_1 f_2 f_4) \\ & + i_3 f_3 (f_2 f_4 f_5 + f_1 f_4 f_5 + f_1 f_2 f_5 + f_1 f_2 f_4). \end{aligned}$$

Division durch $f_1 f_2 f_4 f_5$ ergiebt:

$$i_3 f_3 \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} + \frac{1}{f_4} + \frac{1}{f_5}\right) = V \left\{\left(\frac{2}{f_5} + \frac{1}{f_4}\right) - \left(\frac{1}{f_2} + \frac{2}{f_1}\right)\right\}$$

Daraus ergiebt sich schliesslich das Potential des Mittelleiters:

$$i_3 f_3 = P_3 = V \frac{\left(\frac{2}{f_5} + \frac{1}{f_4}\right) - \left(\frac{1}{f_2} + \frac{2}{f_1}\right)}{\frac{1}{F}} \quad \ldots \quad (51)$$

wenn die Summe der Fehlerleitungen der einzelnen Leiter $= \frac{1}{F}$, der Fehlerleitung des ganzen Systems, gesetzt wird.

Wird ein Ampèremeter vom Widerstande g zwischen Mittelleiter und Erde geschaltet, so ergiebt sich die Stromstärke in demselben mit Zuhülfenahme früherer Betrachtungen:

$$J_3 = \frac{V}{g} \frac{\left(\frac{2}{f_5} + \frac{1}{f_4}\right) - \left(\frac{1}{f_2} + \frac{2}{f_1}\right)}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}} \quad \ldots\ldots \quad (52)$$

Die Stromstärke im Mittelleiter ist also Null, wenn zwischen den Fehlerwiderständen der Einzelleiter die Bedingungsgleichung besteht:

$$\frac{2}{f_5} + \frac{1}{f_4} = \frac{1}{f_2} + \frac{2}{f_1} \cdot \quad \ldots\ldots \quad (52a)$$

Die erhaltene Formel soll nun auf die Methode von **Frölich** angewandt werden. Ein zwischen Mittelleiter und Erde geschaltetes Galvanometer möge den Ausschlag d geben:

$$d = \frac{V}{g} \frac{\left(\frac{2}{f_5} + \frac{1}{f_4}\right) - \left(\frac{1}{f_2} + \frac{2}{f_1}\right)}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}} \quad \ldots\ldots \quad (53)$$

Wird das Galvanometer mit einem Nebenschluss vom Widerstand s versehen, so erscheint der Widerstand s gleichfalls dem Fehlerwiderstande f_3 parallel geschaltet, und der nunmehr erhaltene Ausschlag ist:

$$d' = \frac{V}{g} \frac{\left(\frac{2}{f_5} + \frac{1}{f_4}\right) - \left(\frac{1}{f_2} + \frac{2}{f_1}\right)}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g} + \frac{1}{s}} \quad \ldots\ldots \quad (54)$$

Daraus folgt:

$$\frac{d}{d'} = \frac{\frac{1}{F} + \frac{1}{g} + \frac{1}{s}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}} \quad \ldots\ldots \quad (55)$$

Die Richtigkeit dieser Gleichung lässt sich leicht auch für den Fall beweisen, dass das Galvanometer an irgend einem Punkte eines beliebigen Netzes eingeschaltet ist. Beispielsweise sei es zwischen den einen Aussenleiter eines Dreileiternetzes und Erde geschaltet. Das Potential des Mittelleiters in einem Dreileitersystem ergiebt sich dann nach Gleichung 37a zu

$$P = \frac{\frac{1}{f_3} - \frac{1}{f_1} \mp \frac{1}{g}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}} V.$$

Daraus folgt für die Grösse des Ausschlags bei Einschaltung des Instruments in einen der Aussenleiter:

$$d = \frac{\frac{1}{f_3} - \frac{1}{f_1} \mp \frac{1}{g}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}} \frac{V}{g} \pm \frac{V}{g}.$$

Das obere oder untere Vorzeichen gilt, je nachdem der positive oder negative Aussenleiter angeschlossen ist. Wird das Galvanometer mit einem Nebenschluss s versehen, so wird das Potential der Mittelschiene gegen Erde:

$$P' = \frac{\frac{1}{f_3} - \frac{1}{f_1} \mp \frac{1}{g} \pm \frac{1}{s}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g} + \frac{1}{s}} V$$

und

$$d' = \frac{\frac{1}{f_3} - \frac{1}{f_1} \mp \frac{1}{g} \pm \frac{1}{s}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g} + \frac{1}{s}} \frac{V}{g} \pm \frac{V}{g}.$$

Es ergiebt sich nun wieder wie vorher:

$$\frac{d}{d'} = \frac{\frac{1}{P} + \frac{1}{g} + \frac{1}{s}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}}.$$

Es kann also als erwiesen gelten, dass diese Gleichung ganz allgemein gilt; durch Umformung erhält man:

$$\frac{1}{F}(d - d') = \frac{d'}{s} - \frac{d - d'}{g}$$

und endlich:

$$\frac{1}{F} = \frac{d'}{(d - d')\,s} - \frac{1}{g}. \quad \quad \quad (56)$$

Wenn nun, wie bei der Methode von **Frölich** angenommen ist, g gross ist gegen F, so ist $\frac{1}{g}$ gegen $\frac{1}{F}$ zu vernachlässigen, und es ergiebt sich die einfache Beziehung:

$$F = \frac{d - d'}{d'} s. \quad \quad \quad (57)$$

Setzt man $d' = \frac{1}{2} d$, so wird

$$F = s, \qquad \qquad (58)$$

womit die am Eingang dieses Abschnittes angegebene Behauptung bewiesen ist. Ist es nicht angängig, s so klein zu wählen, dass der Ausschlag des Galvanometers auf die Hälfte reducirt wird, so kann man auch auf andere Verhältnisse von d und d' einstellen.

So wird

$$\text{für: } d' = \frac{2}{3} d: \qquad F = \frac{s}{2},$$

$$\text{- } \quad d' = \frac{3}{4} d: \qquad F = \frac{s}{3} \quad \text{u. s. f.}$$

26. Für Drei- oder Fünfleiteranlagen von mässig hohem Isolationswiderstande — etwa 100 Ohm — erweist sich diese Methode als sehr praktisch. Dann schaltet man das Instrument zweckmässig zwischen Mittelleiter und Erde, und als Widerstand s, der für die Gewinnung der zweiten Ablesung als Nebenschluss dient, kann man, wenn die Messung rasch ausgeführt wird, einen gewöhnlichen Widerstandskasten verwenden. Wenn nöthig, muss in Serie mit dem verwendeten Instrument ein Widerstand geschaltet werden, um der Bedingung zu genügen, dass der Widerstand des Instruments gross ist verglichen mit dem zu messenden Isolationswiderstand.

In Fig. 50 ist die Verwendung solch eines Vorschaltwiderstandes angedeutet. In diesem Fall ist natürlich der Nebenschluss nicht dem Galvanometer allein, sondern dem Galvanometer mitsammt seinem Vorschaltwiderstande parallel zu schalten.

Der thatsächliche Fehler, den die Vernachlässigung des Galvanometerwiderstandes in die Messung des Isolationswiderstandes hineinbringt, lässt sich aus Gleichung 56 schätzen. Hervorzuheben ist indessen, dass der relative Fehler bei der Vergleichung zweier zu verschiedenen Zeiten ausgeführten Messungen in allen Fällen klein bleibt, wenn auch der wirkliche Werth des gesuchten Isolationswiderstandes durch Berücksichtigung der vernachlässigten Grösse beträchtlicher modificirt wird.

Sind die Fehlerwiderstände des positiven und negativen Leiters in einem Dreileitersystem nahezu gleich, oder ist in einem Fünfleiternetz der Gleichung 52a nahezu genügt, so erhält man nur einen kleinen Ausschlag, wenn das Instrument in den Mittelleiter einge-

schaltet wird. Man misst in solchen Fällen zweckmässiger den Erdstrom in einem der äusseren Leiter, doch muss man dann besondere, für stärkere Ströme berechnete Widerstände als Nebenschlüsse s verwenden, da die Spulen gewöhnlicher Widerstandskästen zu sehr erhitzt würden.

Wenn die Prüfung ein Nachlassen der Isolation des Netzes anzeigt, so sieht man leicht, falls die Messungen im Mittelleiter angestellt sind, ob der Fehler im positiven, negativen oder neutralen Leiter liegt (Fig. 52). Nennt man die Ablenkung, die ein durch das Instrument vom Netz zur Erde fliessender Strom hervorbringt, positiv, so wird eine Abnahme des Fehlerwiderstandes des positiven Leiters eine positive Ablenkung verkleinern, eine negative vergrössern, eine Abnahme des Fehlerwiderstandes des negativen Leiters hat die entgegengesetzte Wirkung. Ein Fehler im neutralen Leiter wird die Ablenkung nur sehr wenig verkleinern, wenn man auch den Werth des Nebenschlusses s verringert. Behufs Auswahl eines geeigneten Milliampèremeters oder Voltmeters für fortlaufende derartige Messungen kann man den Werth der zu erwartenden Ablenkung d_1 vorher bestimmen, wenn die Fehlerwiderstände der einzelnen Leitungen bekannt sind. Bei Benutzung eines Milliampèremeters berechnen sich die Stromstärken aus den Gleichungen (42—44). d_2 in Gleichung 43 giebt die Stromstärke an, wenn das Instrument ohne Nebenschluss zwischen Mittelleiter und Erde geschaltet ist. Will man für ein Voltmeter entsprechende Berechnungen anstellen, so ist vor den Klammern in den angeführten Gleichungen statt $\frac{V}{g}$, V einzusetzen. Ist g genügend gross, so kann man $\frac{1}{g}$ innerhalb der Klammern vernachlässigen.

27. Eine vom Verfasser herrührende Modifikation der vorigen Methode ist die folgende: Ein Ampèremeter oder Voltmeter wird, wie bei dieser, zwischen einen Leiter und Erde geschaltet und der Ausschlag abgelesen (vgl. Fig. 49). Dann wird dem Instrument ein Widerstand parallel geschaltet, der seinem eigenen Widerstande genau gleich ist (Fig. 53). Die Ablenkung sei d'. Der Isolationswiderstand des Netzes ist nunmehr gegeben durch die Formel:

$$F = \frac{d - d'}{2\,d' - d}\,g, \quad \ldots \ldots \quad (59)$$

die ohne Weiteres aus der früher abgeleiteten allgemeinen Beziehung

$$\frac{1}{F} = \frac{d'}{(d - d')s} - \frac{1}{g} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (56)$$

folgt, wenn man $g = s$ setzt.

Die Methode ist anwendbar für Netze mit hoher und niedriger Isolation.

Die Formel ist, trotz ihrer Einfachheit, absolut genau, enthält keine Vernachlässigungen und ist gültig, unabhängig von der Art des angewandten Instruments, das nicht direkt zeigend zu sein braucht. Auch die Kenntniss der Konstante des Instruments ist nicht nothwendig, da sich dieselbe wegen der gleichen Dimensionen des Zählers und Nenners von F heraushebt.

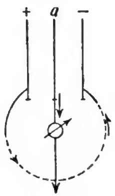


Fig. 52.

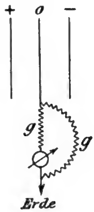


Fig. 53.

Das für diese Messungen zu benutzende Instrument hat zweckmässig einen dem zu messenden Isolationswiderstand möglichst gleichen Widerstand. Gegebenenfalls ist der Widerstand des Instruments durch einen passenden Vorschaltwiderstand auf den gewünschten Werth zu ergänzen. In diesem Falle ist, wie aus Formel 59 folgt, d' etwa $^2/_3\, d$. Im Uebrigen können bei der Wahl eines geeigneten Instruments wieder die Gleichungen (42—44) zu Rathe gezogen werden, wobei das bei der vorigen Methode Gesagte auch hier gilt. Ein Hitzdrahtvoltmeter ist aus schon angeführten Gründen weder für diese noch für die vorige Methode empfehlenswerth.

Dieselben Anzeichen wie bei der vorigen lassen auch bei dieser Methode aus dem Sinne, in dem die Ausschläge sich ändern, schliessen, in welchem Leiter ein Fehler aufgetreten ist. Bekommt der Mittelleiter schwache Isolation, so ändern sich die absoluten Werthe von d_1 und d_2 viel weniger, als wenn ein Fehler von gleicher Stärke in einem der Aussenleiter entsteht.

Die Messungen nach dieser Methode können an einem beliebigen Leiter angestellt werden, obschon es vortheilhaft ist, wenn möglich, den Mittelleiter zu benutzen.

28. In den Fällen, wo die Fehlerwiderstände des positiven und negativen Leiters im Netze nahe gleich sind, im Mittelleiter also eine sehr geringe Stromstärke herrschen würde, ist es doch durch einen einfachen Kunstgriff möglich, im Mittelleiter Ablenkungen zu erhalten. Man stellt nämlich einen künstlichen Fehler dadurch her, dass man einen bekannten Widerstand w zwischen einen der Aussenleiter und Erde schaltet und dadurch das Gleichgewicht stört. Dann berechnet sich der durch den künstlichen Fehler geänderte scheinbare Isolationswiderstand F' nach Formel (59) und der wirkliche Isolationswiderstand des Netzes ist gegeben durch die Gleichung:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F'} - \frac{1}{w} \quad \text{. . . . .} \quad (60)$$

29. Beispiele: A. Ein Ampèremeter von 10 Ohm Widerstand gab zwischen Mittelleiter und Erde direkt: $d = 1{,}38$ Ampère. Mit einem Nebenschluss von 10 Ohm versehen: $d' = 0{,}91$ Ampère. Daraus:

$$F = \frac{1{,}38 - 0{,}91}{1{,}82 - 1{,}38} \, 10 = 10{,}7 \text{ Ohm}.$$

B. Ein Voltmeter von 300 Ohm Widerstand gab zwischen Mittelleiter und Erde direkt: $d = 3{,}74$ Volt. Mit einem Nebenschluss von 300 Ohm versehen: $d' = 2{,}54$ Volt. Daraus:

$$F = \frac{3{,}74 - 2{,}54}{5{,}08 - 3{,}74} \, 300 = 269 \text{ Ohm}.$$

30. Methode der Wheatstone'schen Brücke. Fig. 54 stellt das Schaltungsschema dar, wenn eine Brücke mit ausgespanntem Messdraht benutzt wird. r ist ein bekannter Widerstand, l einige parallel geschaltete Glühlampen, S ein Schlüssel. Die Messung wird am genauesten, wenn der Widerstand r nahe gleich dem zu messenden Isolationswiderstande ist, weil dann der Schleifkontakt P sich in seiner Gleichgewichtslage in der Mitte des Schleifdrahtes AB befindet, wo die Einstellung am empfindlichsten ist. Wenn indessen der Isolationswiderstand des Netzes niedrig ist, muss r doch grösser gewählt werden, weil sonst der Schleifdraht durch den in diesem Falle starken Strom zu sehr erhitzt würde. Das Galvanometer muss ziemlich empfindlich sein.

Die Lage des Schleifkontaktes P wird nun so geregelt, dass das Galvanometer denselben Ausschlag giebt, mag der Kontakt bei S offen oder geschlossen sein. Man stellt also auf den „falschen“, nicht auf den wirklichen Nullpunkt, wie bei gewöhnlichen Brückenmessungen, ein. Der Isolationswiderstand des Netzes ist dann:

$$F = \frac{a}{b} r \quad \text{. . . . . (61)}$$

Die Anordnung, wenn eine Messbrücke der in § 7 beschriebenen Art benutzt wird, ist in Fig. 55 angegeben. Die hier benutzte Form der Brücke weicht von der l. c. erwähnten in einigen Einzelheiten ab. Das Verhältniss $a:b$ soll bei diesen Messungen so gross

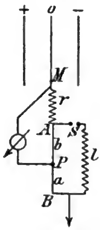


Fig. 54.

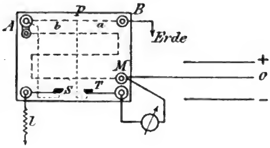


Fig. 55.

wie möglich genommen werden, so dass r ebenfalls gross ist, damit nur ein schwacher Strom durch die Widerstände der Brücke fliessen kann. Als Widerstand l kann man wiederum einige parallel geschaltete Glühlampen benutzen. Der Galvanometerschlüssel T muss dauernd geschlossen sein; r wird wieder so lange verändert, bis die Bedingung des Gleichgewichts erfüllt ist, d. h. bis der Galvanometerausschlag bei Oeffnen und Schliessen des Kontaktes S gleich bleibt. Dann ist, wie oben

$$F = \frac{a}{b} r.$$

Es kann der Fall eintreten, dass die Fehlerwiderstände des positiven und negativen Leiters der Bedingung dafür genügen, dass das Potential des Mittelleiters gegen Erde Null ist; in diesem Falle wird kein Strom in die Brücke fliessen, wenn sie an den Mittelleiter des Netzes angeschlossen ist. Da man principiell die Brücke

an jeden beliebigen Punkt des Netzes legen kann, so könnte man dann den Anschlusspunkt in einem anderen Leiter als dem Mittelleiter wählen. In Wirklichkeit ist es jedoch vorzuziehen in einem solchen Falle die Brücke trotzdem an die neutrale Schiene anzulegen, jedoch eine Batterie von wenigen Elementen mit den Glühlampen *l* in Reihe zu schalten. Dadurch umgeht man die im anderen Falle vorliegende Gefahr eines für die Brücke zu starken Stromes.

Ist schon vor Schluss des Unterbrechers *S* die Ablenkung des Galvanometers so gross, dass sie über die Skala hinausgeht, so wird sie durch Nebenschliessung des Instruments auf einen passenden Werth reducirt, was allerdings wieder den Nachtheil einer verringerten Empfindlichkeit mit sich bringt. Benutzt man ein Galvanometer mit schwingendem Magnetsystem, so kann man die Nadel auch durch einen Richtmagneten in die Nähe des Nullpunkts zurückbringen.

Einen eleganten Kunstgriff, um die durch den ständigen Strom in der Brücke vorhandene Ablenkung zu beseitigen, hat Frölich angegeben. Er schaltet in den Galvanometerzweig die primäre Rolle eines Induktionsapparates, an dessen sekundäre Rolle das Galvanometer angeschlossen ist. In der Regel ist das Galvanometer stromlos, wird aber durch Schliessen oder Oeffnen des Kontaktes *S* eine Aenderung der Stromstärke im Galvanometerzweig hervorgerufen, so erhält das Galvanometer durch Induktionswirkung einen Stromstoss. Man regulirt nun den veränderlichen Widerstand resp. den Schleifkontakt so lange, bis beim Oeffnen und Schliessen von *S* ein solcher Stromstoss nicht mehr eintritt. Ersichtlich kann man bei dieser Anordnung das Galvanometer durch ein Telephon ersetzen und den Kontakt *S* durch ein rotirendes Kontakträdchen, das eine dauernde Ablenkung im Galvanometer resp. einen Ton im Telephon erzeugen würde. Allerdings kann diese Anordnung von Frölich infolge Kapacitätswirkungen unzuverlässig werden.

31. Allgemeine vergleichende Bemerkungen zu den vorhergehenden Methoden. Welche Methode man auch anwendet, in jedem Fall ist es vortheilhaft, ein registrirendes Voltmeter mit hohem Widerstande dauernd zwischen einen oder je eines zwischen beide Aussenleiter und Erde zu schalten. Wie schon früher hervorgehoben, kann man auf diese Weise die Entstehung des Fehlers verfolgen, man findet leicht den schuldigen Leiter heraus und hat an der auf-

gezeichneten Kurve eine thatsächliche Unterlage über den täglichen Isolationszustand. Als Ersatz für ein registrirendes Instrument kann man nöthigenfalls ein gewöhnliches Voltmeter mit hohem Widerstande oder ein elektrostatisches Voltmeter nehmen, von dem stündlich die Ablesungen zu notiren sind.

Von den beschriebenen Methoden ist die der Wheatstone'schen Brücke zweifellos die genaueste, indessen hat sie den Nachtheil, keine Messung der relativen Fehlerwiderstände der einzelnen Leiter zu gestatten. Allerdings kann man ja bei Benutzung eines registrirenden Voltmeters sehen, ob ein Fehler auf der positiven oder negativen Seite des Netzes auftritt; doch erfordert das immerhin einige Uebung, und es bleibt meist einige Unsicherheit darüber bestehen, ob der Fehler sich im Mittelleiter oder in einem der Aussenleiter befindet. Hier muss dann die allgemeine Regel aushelfen, dass ein Nachlassen des Isolationswiderstandes eine stärkere Aenderung in der Potentialdifferenz der Leiter gegen Erde hervorruft, wenn der Fehler im Aussen- als wenn er im Mittelleiter liegt. In Dreileiteranlagen benutzt man zweckmässig die Methode der Wheatstone'schen Brücke gelegentlich zu einer genauen Bestimmung des Isolationswiderstandes, während eine der anderen Methoden für die täglichen Messungen zu verwenden ist. Für Zweileiternetze ist die Messung mittels der Wheatstone'schen Brücke ganz einwandsfrei, da man bei solchen Netzen durch Einschalten eines Voltmeters oder Ampèremeters zwischen einen Leiter und Erde sofort sieht, auf welcher Seite der Fehler liegt. Es möge noch erwähnt werden, dass die Methode der Wheatstone-Brücke von Frölich für eine automatische Anzeige der Isolationswerthe ausgebildet worden ist.

Zuweilen erscheint es nicht wünschenswerth, den Erdstrom von einem der Leiter, besonders von einem der Aussenleiter, auf kurze Zeiten beträchtlich anwachsen zu lassen. Dann ist die Wahl der Methode schwierig, in vielen Fällen ist eine genaue Messung des Isolationszustandes dann überhaupt nicht möglich. Die erstbeschriebene Methode von Frölich wäre unter diesen Umständen noch am besten, doch erfordert sie eventuell eine Reihe geaichter Starkstromwiderstände, die ziemlich kostspielig sind. Die Methode von Frisch empfiehlt sich bei Verwendung von Voltmetern mit mässig hohem Widerstande. Die Nachtheile dieser Methode, wenn der Voltmeterwiderstand gross ist gegen den Isolationswiderstand des Netzes, waren schon hervorgehoben. Die Nebenschlussmethode ist

unter den gegebenen Umständen dieses Falles ebenfalls nicht empfindlich.

In den meisten anderen Fällen ist indessen die letztere Methode recht angebracht. Sie ist nicht ganz so empfindlich, wie die Methode von Frisch, hat jedoch die Vortheile einer indirekten Erdung des Mittelleiters allein, sowie die Möglichkeit, ein Instrument mit kleinerem Messbereich verwenden zu können, als es die Methode von Frisch erfordert. Wo die Fehlerwiderstände der Einzelleiter in einer solchen Beziehung stehen, dass vom Mittelleiter kein Strom zur Erde fliessen kann, ist jedoch die Methode von Frisch vorzuziehen, anstatt dass man die andere Methode durch Einführung eines künstlichen Fehlers komplicirt.

Es sei noch erwähnt, dass bei allen Messungen der gemessene Isolationswiderstand in Wirklichkeit der Isolationswiderstand des Netzes, der Maschinenstation, der Schaltbretter etc. in Parallelschaltung ist. Bei gut gebauten Anlagen sind indessen normalerweise die Erdströme von Maschinen, Schaltbrett etc. gegenüber den Erdströmen des Netzes zu vernachlässigen, und wenn in einer Maschine oder in den Akkumulatoren ein Erdschluss eintritt, wird er sofort entdeckt.

Ampèremeter und Voltmeter, die Ablesungen beiderseits vom Nullpunkt zulassen, sind für Isolationsmessungen am brauchbarsten. Es giebt auch Instrumente, die zwar nur einseitig ablesen lassen, in denen jedoch ein besonderer Zeiger die Stromrichtung angiebt; dieselben erfüllen natürlich denselben Zweck. Instrumente, die an eine einseitige Stromrichtung gebunden sind, müssen als ungeeignet für derartige Messungen angesehen werden.

32. Netze, die dauernd an Erde liegen. Wenn ein Leiter eines Netzes in seiner ganzen Ausdehnung dauernd an Erde liegt — blanker Mittelleiter bei Dreileiteranlagen — ist eine Messung des Isolationszustandes nach den angegebenen Methoden nicht möglich. In solchen Fällen ist das Nachlassen der Isolation nur durch ungewöhnlich hohes Anwachsen der Stromstärke, Sinken der Spannung, Durchbrennen der Sicherungen und ähnliche Anzeichen zu entdecken.

In einigen Anlagen ist einer der Leiter in der Centrale über ein Ampèremeter ständig an Erde gelegt, während er an allen anderen Punkten isolirt ist. Bei plötzlichem Ausbruch eines Fehlers an irgend einer Stelle des Netzes wird eine plötzliche Aenderung der Stromstärke in diesem Ampèremeter zu konstatiren sein. Indessen geben, ausgenommen den Fall, wo der Fehler dermassen

plötzlich auftritt, die Ablesungen am Ampèremeter keinen genügenden Aufschluss über den Isolationszustand des Netzes, obwohl man das gewöhnlich annimmt.

Die Stromstärke in Ampère, die vom Mittelleiter durch das Ampèremeter zur Erde fliesst, ist nach früheren Ableitungen für ein Dreileiternetz:

$$J = \frac{\frac{1}{f_3} - \frac{1}{f_1}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}} \frac{V}{g}, \quad \ldots \ldots \quad (43)$$

wo f_1, f_3 die Fehlerwiderstände der beiden Aussenleiter, F der Isolationswiderstand des gesammten Netzes, g der Widerstand des Ampèremeters, sämmtlich in Ohm, und V die Spannung zwischen zwei anliegenden Leitern in Volt bedeuten.

In dem geerdeten negativen Leiter eines Zweileiternetzes würde die Stromstärke betragen

$$J' = \frac{-\frac{1}{f_1}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{g}} \frac{V}{g}, \quad \ldots \ldots \quad (23\,b)$$

wobei die Zeichen dieselben Bedeutungen haben.

Angenommen also, das den Mittelleiter eines Dreileiternetzes erdende Ampèremeter zeige einen zur Erde fliessenden Strom an, und eine gewisse Zeit lang nehme diese Stromstärke ständig ab. Die Ursache für dieses Verhalten kann einerseits in einem Nachlassen des Erdstroms vom negativen Leiter her liegen, andererseits aber auch in der Entwickelung eines Fehlers im positiven oder eines sehr erheblichen Erdschlusses im negativen Leiter. Man kann deshalb nicht mit Bestimmtheit angeben, ob am Netz etwas in Unordnung ist oder nicht. Ein Fehler im Mittelleiter müsste überhaupt schon ausserordentlich stark sein, um eine Aenderung im Ausschlag des Ampèremeters herbeizuführen. Wenn überdies die Fehlerwiderstände im positiven und negativen Leiter eines Dreileiternetzes gleich sind, so würde gar kein Strom des Ampèremeters durchfliessen ohne Rücksicht auf die gute oder schlechte Beschaffenheit des Mittelleiters.

Das Ampèremeter, an das im Uebrigen die früher schon aufgestellten Bedingungen in Bezug auf Zeigerausschlag und Stromrichtung zu stellen sind, kann nach diesen Betrachtungen nur als ein unvollständiger Fehlerindikator angesehen werden, indessen sind

doch jene unsicheren Angaben immerhin einem Mangel jeglicher Kontrolle vorzuziehen.

Nennt man den Ausschlag, den ein vom Mittelleiter zur Erde fliessender Strom hervorruft, positiv, so lässt eine positive Ablenkung auf bessere Isolation der positiven Seite, eine negative auf bessere Isolation der negativen Seite schliessen.

33. Es ist nun die Möglichkeit gegeben, mit Hülfe einer einfachen Schaltung die vom Verfasser modificirte Frölich'sche Methode auf solche Netze anzuwenden. Man bedient sich dazu eines Stöpselschalters mit drei Kontaktstücken (Fig. 56). Das einen kleinen Widerstand besitzende Ampèremeter wird zwischen 1 und Erde geschaltet. Der Mittelleiter ist an 2 angelegt, 1 und 2 sind durch eine Spule von bekanntem Widerstande verbunden, dessen Grösse ungefähr dem des

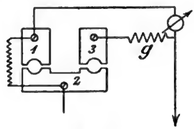


Fig. 56.

zu messenden Isolationswiderstandes gleich ist. Stöpselt man zwischen 1 und 2, so liegt infolge Kurzschlusses der Widerstandsspule das Ampèremeter direkt zwischen Netz und Erde; der Stöpsel bleibt in der Regel an dieser Stelle, ausgenommen, wenn man eine Messung vornimmt. Dadurch, dass man ihn entfernt, schaltet man den Widerstand vor das Ampèremeter und erhält Ablesung d (vgl. Fig. 49). Nun befindet sich zwischen 3 und Erde, wie in Fig. 56 angedeutet ist, gleichfalls ein Widerstand, der gleich dem Ampèremeterwiderstande plus seinem Vorschaltwiderstande ist. Stöpselt man daher 2, 3, so erhält das Ampèremeter durch diesen Widerstand einen Nebenschluss, der gleich seinem eigenen Gesammtwiderstande ist, und man erhält Ablesung d'. Sofort nach Beendigung der Messungen stellt man die Stöpselung 1, 2 wieder her. Auf diese Weise ist die Verbindung zwischen Mittelleiter und Erde nie unterbrochen, sondern erhält nur zur Zeit der Messungen zeitweilig einen höheren Widerstand.

34. Eine andere Gruppe dauernd geerdeter Netze sind solche, deren Mittelleiter nur an den Speisepunkten an Erde liegt. Auch

hier kann man eine Ampèremetermethode zur Prüfung benutzen; die Frölich'sche Methode zur Bestimmung des wirklichen Isolationswiderstandes ist in diesem Falle nicht anwendbar. An einem möglichst leicht zugänglichen Speisepunkte wird ein Ampèremeter, dessen Widerstand nur Bruchtheile eines Ohm betragen darf, zwischen Mittelleiter und Erde gelegt; an den anderen Speisepunkten wird der Mittelleiter nicht direkt geerdet, sondern durch Widerstände, die dem Ampèremeterwiderstande gleich sind. Diese kleinen Widerstände vermögen die Güte der Erdung an den Speisepunkten in keiner Weise zu beeinträchtigen. Dann lassen sich aus den Ampèremeterablesungen dieselben Schlüsse auf den Isolationszustand des Netzes ziehen, die oben bereits angeführt sind.

Die das Ampèremeter durchfliessende Stromstärke ist, wenn die Zahl der geerdeten Speisepunkte n beträgt, für ein Dreileiternetz:

$$J = \frac{\frac{1}{f_3} - \frac{1}{f_1}}{\frac{1}{F} + \frac{n}{g}} \frac{V}{g} \quad \ldots \ldots \quad (62)$$

Für den in ähnlicher Weise an den Speisepunkten geerdeten negativen Leiter eines Zweileiternetzes ergiebt sich:

$$J' = -\frac{\frac{1}{f_1}}{\frac{1}{F} + \frac{n}{g}} \frac{V}{g} \quad \ldots \ldots \quad (63)$$

35. Isolationskontrolsystem zur direkten Anzeige von Stromentweichungen. Wie schon hervorgehoben, versagen sämmtliche bisher beschriebenen Anordnungen, wenn es sich darum handelt, den Isolationszustand eines Systems zu bestimmen, das bereits einen ständigen Erdschluss hat, im besonderen also bei Dreileiteranlagen mit blankem Mittelleiter. Für solche Fälle hat neuerdings Kallmann eine auf ganz anderen Principien beruhende Methode angegeben. Bei derselben wird nicht der Isolationswiderstand als solcher, sondern direkt die Stromstärke (leakage current) gemessen, die infolge mangelhafter Isolation des Netzes nutzlos verloren geht, oder vielmehr die Differenz der Stromstärken, welche die beiden Leiter verschiedener Polarität oder Anfang und Ende desselben Leiters durchfliessen.

Der Grundgedanke des Systems ist der folgende: Wenn im positiven und negativen Leiter eines Netzes — der Einfachheit halber sei zunächst auf die Verhältnisse in einem Zweileiternetz eingegangen — die Isolation gleich gut ist, so wird die Stromstärke in beiden Leitern gleich und lediglich durch die Verbrauchsapparate bestimmt sein. Man denke sich nun in die positive und negative Leitung unmittelbar hinter der Maschine je ein Ampèremeter eingeschaltet (Fig. 57). Bei guter Isolation zeigen beide Instrumente

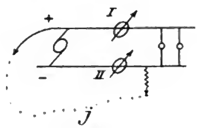


Fig. 57.

gleich. Tritt jedoch ein Erdstrom auf, so wird sich dessen Intensität j zu der in dem einen Leiter herrschenden Stromstärke addiren, und das in dieser Leitung befindliche Instrument zeigt eine höhere Stromstärke an. Die Differenz beider Ablesungen würde die Stärke des Erdstromes ohne weiteres angeben, angenommen, dass kein Erdschluss im anderen Leiter vorhanden ist. Da die Unterschiede in der Stromstärke indessen nur gering sind, die Instrumente also bei hoher Verbrauchsstromstärke auch für kleine Aenderungen schon empfindlich sein müssten, so fasst man zweckmässig beide Instrumente zu einem Differentialinstrument zusammen.

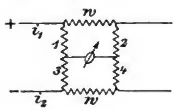


Fig. 58.

Eine für die verschiedensten Zwecke und Anwendungen sehr brauchbare Form der ganzen Anordnung erhält man, wenn man sich einer Schaltung ähnlich der in der Thomson'schen Doppelbrücke bedient (Fig. 58). In die zu prüfenden Leitungen werden genau gleiche Hauptstromwiderstände w eingeschaltet. Die infolge mangelhafter Isolation verschiedenen Stromstärken i_1, i_2 rufen an den Enden der Widerstände verschiedene Spannungsdifferenzen $i_1 w$, $i_2 w$ her-

vor. Diese Spannungsdifferenzen werden durch besondere Leitungen (gegebenenfalls durch die Prüfdrähte) an die Klemmen der Galvanometer übertragen und rufen dort eine Stromstärke hervor, die proportional ihrem Unterschiede $w\,i_1 - w\,i_2$, also auch proportional der Differenz der Stromstärken $i_1 - i_2$ ist. In die Leitungen sind Vorschaltwiderstände 1, 2, 3, 4 gelegt, um sämmtliche Zuleitungen auf denselben Widerstand abzugleichen. Beachtung verdient, dass die Thomson'sche Doppelbrücke hier zur Vergleichung von Stromstärken gebraucht wird, während bei der üblichen Verwendung ein gleicher Strom ungleiche Widerstände durchfliesst und dadurch die verschiedenen Spannungsdifferenzen erzeugt, die auf das Galvanometer einwirken.

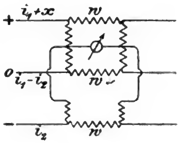


Fig. 59.

Fig. 59 zeigt die Methode in ihrer Anwendung auf Dreileiteranlagen. Ist z. B. im positiven Leiter ein Erdstrom von der Intensität x, so zeigt das Instrument an, wie sich aus der Figur unmittelbar ergiebt:

$$i_1 + x - i_2 - (i_1 - i_2) = x.$$

Als Galvanometer ist in jedem Falle ein empfindliches Instrument mit möglichst niedrigem Widerstande und kleinem V (vgl. § 10) zu wählen. Der Grad der Empfindlichkeit richtet sich nach der geringsten Stärke des Erdstroms, die noch nachgewiesen werden soll.

Vortheilhafte Anwendung erfährt die Kallmann'sche Methode bei der ständigen Kontrolle des Isolationszustandes einzelner Speiseleitungen, ohne dieselben vom Netze abzutrennen. Wenn die Speiseleitung nicht einen zu grossen Querschnitt hat, so können kurze Stücke der Leitung selbst als Hauptstromwiderstände benutzt werden (Fig. 60). Dieselben werden dann an Anfang und Ende der zu untersuchenden Speiseleitungen gelegt. Von den Enden der Messstrecken führen Prüfdrahtleitungen zu der Doppelbrückenschaltung. Als Beispiel wollen wir ein Kabel von 250 qmm Querschnitt an-

nehmen. Die Messstrecken mögen eine Länge von je 5 m haben; dann beträgt ihr Widerstand, da ein km des Kabels 0,07 Ohm Widerstand besitzt, 0,000035 Ohm. Bei der Messstrecke *I* sei die Stromstärke $i_1 = 100$ Ampère, bei *II* wegen eines vorhandenen Fehlers nur $i_2 = 95$ Ampère. Es hat also zwischen *I* und *II* ein Verlust von 5 Ampère stattgefunden, die in die Erde entwichen sind. An den Enden von *I* herrscht infolge der Stromstärke i_1 eine Spannungs-

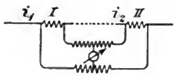


Fig. 60.

differenz von 0,0035 Volt, an den Enden von *II* eine solche von 0,00332 Volt. In der Brückenschaltung kommen demnach zur Wirksamkeit

$$0{,}0035 - 0{,}00332 = 0{,}000175 \text{ Volt}.$$

Bei einem Widerstande der Zuleitungen von 30 Ohm und bei 50 Ohm Galvanometerwiderstand würde also das Galvanometer von einem Strome der Intensität $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ Ampère durchflossen werden. Eine solche Stromstärke ist aber mit einem einigermaassen empfindlichen Instrument bequem nachweisbar. Bei normalem Isolationszustand würde natürlich kein Strom durch das Galvanometer fliessen.

Zu beachten ist bei der Kallmann'schen Methode, dass bei der Isolationskontrolle von Zwei- oder Mehrleitersystemen, wie sie z. B. in den Fig. 58 und 59 angedeutet ist, die Differenz der Leckströme in den Leitern verschiedener Polarität und nicht der maximale Leckstrom angezeigt wird. Bei Zweileitersystemen, wie auch bei Dreileiternetzen wird daher, wenn der positive und negative Leiter gleiche Fehlerwiderstände bezw. gleichen Stromverlust besitzen, kein Ausschlag am Galvanometer zustande kommen können.

36. Wechselstromniederspannungsnetze. Als Wechselstromniederspannungsnetze werden solche Netze bezeichnet, in denen die Betriebsspannung niedriger ist als 250 Volt[1]). In solchen Netzen liessen sich die für Gleichstrom angegebenen Methoden nicht ohne Weiteres verwenden, auch wenn man Wechselstrommessinstrumente benutzen würde. Es stehen nämlich in diesem Falle der Ueber-

[1]) Indessen gelten die Darlegungen dieses § auch für Mittelspannungsnetze (250—1000 Volt).

tragung jener Methoden auf Wechselstromnetze Bedenken allgemeinerer Natur entgegen, die eine solche Verwendung mit Aussicht auf Erfolg nur unter ganz besonderen, jedesmal zu prüfenden Umständen rathsam erscheinen lassen. Technisch brauchbare Wechselstrommessinstrumente mit einer Empfindlichkeit, die denen der Gleichstrominstrumente nach Deprez-d'Arsonval entspricht, giebt es bisher kaum. Die Hitzdrahtinstrumente, die für exakte Wechselstrommessungen fast ausnahmslos in Betracht kommen, geben, wie schon früher hervorgehoben, für Isolationsmessungen verwandt, bei denen der Widerstand des Instruments selbst in das Endresultat eingeht, wegen der Veränderlichkeit dieser Grösse zu Fehlern Veranlassung.

Eine noch weit erheblichere Fehlerquelle bei Wechselstrommessungen dieser Art bringt der infolge der Kapacität der Leitungen selbst bei vollkommenster Isolation auftretende Ladungsstrom in die Messung hinein. Der Einfluss und die Grösse dieser Fehlerquelle lässt sich stets mit ziemlicher Sicherheit angeben. Ist die Betriebsspannung V Volt, die sekundliche Periodenzahl des Wechselstroms n, die Gesammtkapacität des Netzes gegen Erde C Mikrofarad, so tritt bei Annahme vollkommener Isolation ein Ladungsstrom auf von der Intensität:

$$J_0 = \frac{2\pi . n C . V}{10^6} \text{ Ampère.} \quad \quad \quad (64)$$

Für eine Betriebsspannung von 500 Volt und eine Periodenzahl von 50 pro Sekunde würde demnach bei einer Gesammtkapacität des Netzes von 1 Mikrofarad der Ladestrom betragen:

$$J_0 = \frac{2 . 50 . \pi . 500 . 1}{1\,000\,000} = 0{,}157 \text{ Ampère.}$$

Eine solche Stromstärke wäre, wie die früher angegebenen Beispiele zeigen, sehr wohl im Stande, die Messung des Isolationswiderstandes beträchtlich zu beeinflussen, andererseits ist es auch kaum möglich, die Intensität des Ladestroms von der gesammten Stromstärke in Abzug zu bringen, da eine rechnerische Bestimmung des Ladestroms wegen der Phasenverschiedenheit zwischen Lade- und Isolationsstrom und der Schwierigkeit, bei mässiger Gesammtisolation die Kapacität zu messen, nicht einwandsfrei zu erreichen ist. Bei einigermassen ausgedehnten Netzen macht also die grosse Kapacität der Leitungen eine Isolationsmessung mit Wechselstrom unmöglich, bei kleineren Anlagen und Kabelstrecken, wo der Ladestrom ohne

Einfluss bleiben würde, ist der Gesammtisolationswiderstand so hoch, dass die Wechselstrominstrumente die geringe Stärke des Erdstroms nicht anzeigen würden.

37. Für Netze mit nicht allzu hohem Isolationswiderstand, in denen die Intensität des Ladestroms vernachlässigt werden kann, z. B. für grössere Hausanschlüsse, hat die Allgemeine Elektricitätsgesellschaft einen Isolationsmesser konstruirt, der es gestattet, den Isolationswiderstand mit der Betriebsspannung zu messen.

Die primäre Wickelung *A* eines kleinen, im Innern des Apparates sitzenden Transformators (Fig. 61) ist an das Netz angeschlossen, dessen Betriebsspannung zur Isolationsmessung verwendet werden

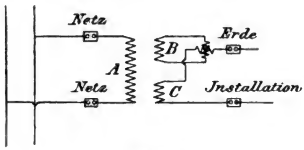


Fig. 61.

soll. Der Transformator hat zwei sekundäre Wickelungen; die eine, *B*, ist mit der festen Spule eines dynamometerähnlichen Instrumentes verbunden, die andere geht einerseits über die bewegliche Spule des Instruments zu der mit „Erde“, andererseits zu der mit „Installation“ bezeichneten Klemme. Um die Bedingung zu erfüllen, dass die Messung mit der Betriebsspannung stattfinden soll, haben die Windungen *A* und *C* des Transformators gleiche Windungszahl. Es herrscht also zwischen Isolation und Erde dieselbe Spannungsdifferenz wie im Netz. Die Empfindlichkeit des Apparates lässt sich beliebig variiren durch geeignete Wahl der Windungszahl für die feste Spule des Instruments. Mit der beweglichen Spule, die von dem Erdstrom der Installation durchflossen wird, ist ein Zeiger verbunden, der über einer in Ohm getheilten Skala spielt. Die Angaben des Instruments sind nur dann richtig, wenn die der Aichung zu Grunde liegende Betriebsspannung thatsächlich vorhanden ist. Davon kann man sich überzeugen, wenn man die bewegliche Spule kurz schliesst, also die Klemmen Installation und Erde durch einen Draht mit einander verbindet, dann ist das Instrument ein Voltmeter, und man kann auf einer zweiten Theilung der Skala die vorhandene Betriebs-

spannung ablesen. Mit dem Instrument lassen sich Isolationswiderstände von 1 Megohm abwärts bei 120 Volt Betriebsspannung messen. Die Instrumente werden bis zu einer Spannung von 550 Volt ausgeführt. Der Apparat, Fig. 62, befindet sich in einem viereckigen polirten Holzkasten, der an der einen Seite der Wand einen Ledergriff und die vier geschlossenen Klemmen enthält. Die Skala selbst kann durch einen Klappdeckel abgeschlossen werden, so dass das Instrument bequem als Montageinstrument verwendet werden kann.



Fig. 62.

38. Verzichtet man auf die Bedingung, die Isolationsmessung mit dem Wechselstrom selbst auszuführen, so kann man mittels über den Wechselstrom gelagerten Gleichstroms, der einer kleinen Batterie entnommen wird, und Gleichstrominstrumenten, die durch Wechselströme nicht beeinflusst werden, auch während des Betriebes Isolationsmessungen ausführen. Fig. 63 zeigt die übliche Schaltung: Legt man den Hebel nach a, so bestimmt man die Empfindlichkeit des Instruments aus der elektromotorischen Kraft der Batterie und dem eingeschalteten Widerstand W. Der Ausschlag sei α_1. Legt man

den Hebel nach b, so misst man den Erdstrom, der einen Ausschlag α_2 ergebe. Ist der Widerstand des Galvanometers G, so berechnet sich der Isolationswiderstand R aus der Formel:

$$R = \frac{\alpha_1 (G + W)}{\alpha_2} - G. \quad \ldots \ldots \quad (65)$$

Ist G klein gegen W, so lässt sich diese Formel auch schreiben:

$$R = W \frac{\alpha_1}{\alpha_2}.$$

Zweckmässig schaltet man eine feine Schmelzsicherung zwischen b und das Netz ein, auch darf man bei der Wahl des Galvanometers

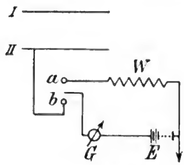


Fig. 63.

nicht ausser Acht lassen, dass die Spulen des Instrumentes sowohl den Wechselstrom vom Netz zur Erde wie auch den Gleichstrom zu ertragen haben.

Auch die Methode der Wheatstone'schen Brücke ist für die Isolationsmessung bei Wechselströmen zu verwenden, wenn man eine Batterie von einigen Elementen in den einen Diagonalzweig (den Zweig l der Fig. 54) schaltet und ein Galvanometer benutzt, das durch Wechselströme nicht beeinflusst wird.

Sieht man von einer zahlenmässigen Bestimmung des Isolationswiderstandes überhaupt ab, so kann die Messung der Potentialdifferenz zwischen jedem Leiter und Erde eine vergleichende Angabe über den jeweiligen Isolationszustand des Netzes liefern. Nimmt man dieselbe täglich vor, so wird das Nachlassen der Isolation oder die Entstehung eines Fehlers in den meisten Fällen früher oder später durch die veränderte Anzeige des Voltmeters wahrgenommen werden.

Drittes Kapitel.

Isolationsmessungen in Hochspannungsnetzen während des Betriebs.

39. Während in Niederspannungsanlagen die regelmässige Vornahme von Isolationsmessungen eine unerlässliche Maassregel zur Verhütung von Betriebsstörungen bilden, wird in der Regel in Hochspannungsnetzen ein Fehler nicht eher entdeckt, bevor er zu einem völligen Erdschluss ausgeartet ist. Der normale Isolationswiderstand eines Hochspannungskabels ist allerdings mindestens einige Hundert Megohm pro km, indessen ein einziger Anschluss an die Schalter und Transformatoren besitzt infolge der an den Apparaten auftretenden Oberflächenleitung einen selten über 10 Megohm betragenden Isolationswiderstand. Im Betriebe wird daher, bevor der Fehler so gross geworden ist, um sich durch einen messbaren Unterschied im Isolationswiderstande des an die Verbrauchsapparate angeschlossenen Netzes bemerkbar machen zu können, das Kabel vorher durchschlagen und völligen Erdschluss annehmen. Viel koncentrische Systeme bilden jedoch Ausnahmen. Bei einem gut isolirten koncentrischen System befindet sich infolge des Kondensatoreffektes der Aussenleiter auf einem verhältnissmässig niedrigen Potential gegen Erde. Wenn dann ein Fehler in diesem Leiter auftritt, erniedrigt er allmählich den Isolationswiderstand desselben, sein Potential nimmt gleichfalls ab, und auf diese Weise liesse sich durch tägliche Messungen am Netz der Fehler entdecken, bevor er in einen totalen Erdschluss ausgeartet ist.

Leiter, welche Unterstationen speisen, haben gleichfalls in der Regel einen hohen Isolationswiderstand, da sie gewöhnlich nur zwei

Enden besitzen. Ein Fehler wird sich also auch hier gegebenenfalls anzeigen, bevor sein Widerstand so niedrig wird, dass die Gefahr des Durchbrennens auftritt.

Doch selbst für den Fall, dass die Messungen erst das Vorhandensein eines völligen Erdschlusses anzeigen, sind sie nicht von der Hand zu weisen, denn es kann vorkommen, dass ein Kabel durchschlägt, ohne dass die Sicherungen abschmelzen. Allerdings merkt man den Eintritt eines Erdschlusses in vielen Fällen erst auch an der ausserordentlich vermehrten Stromentnahme aus der Maschine, die so gross werden kann, dass die Maschine Schaden nimmt.

Befinden sich in dem Bezirk des Hochspannungsnetzes, in dem der Fehler auftritt, Telephonleitungen, für welche die Erde als Rückleitung verwendet wird, so kündigt sich ein stärkeres Nachlassen der Isolation und erst recht ein Erdschluss untrüglich durch sehr intensive Telephonstörungen an. Durch Absuchen der Apparate, in denen dieselben am heftigsten sind, lässt sich sogar oft der Ort des Fehlers mit ziemlicher Sicherheit angeben.

Bei einem Netz, in dem ein Leiter an nur einem Punkt ständig geerdet ist, kann man zweckmässig das Potential an verschiedenen Punkten des geerdeten Leiters mit einem zwischen Kabel und Erde gelegten Voltmeter messen; auf diesem Wege liesse sich das Auftreten eines Erdschlusses in diesem Leiter erkennen. Ein Fehler in einem der anderen Leiter würde nicht eher entdeckt werden, bevor er zu einem völligen Kurzschluss geworden ist oder eine Sicherung abgeschmolzen hätte.

40. Gleichstromhochspannungsnetze. Für die Isolationsmessungen an Gleichstromhochspannungsnetzen, bei denen kein ständig geerdeter Leiter vorhanden ist, eignet sich insbesondere die im vorigen Kapitel beschriebene Methode von Frisch. Man bedient sich also eines Voltmeters, das zwischen je einen der Leiter und Erde gelegt wird. Dem Voltmeter ist ein gut isolirter Widerstand vorzuschalten. Mit Benutzung der schon früher benutzten Ableitungen ist dann der Isolationswiderstand des Systems durch die Formel gegeben:

$$F = g\left(\frac{V}{d_1 + d_2} - 1\right),$$

während die Fehlerwiderstände der Einzelleiter sich ausdrücken in der Form:

$$f_1 = \frac{g\,(V - (d_1 + d_2))}{d_2}$$

$$f_2 = \frac{g\,(V - (d_1 + d_2))}{d_1}.$$

g ist der Widerstand von Voltmeter plus Vorschaltwiderstend, $d_1 + d_2$ die arithmetische Summe der Ausschläge, V die Betriebsspannung.

Es ist stets mehr oder weniger gefährlich, die zu solchen Messungen nothwendigen Verbindungen während des Betriebes vorzunehmen. Man bringt daher zweckmässig ein besonderes kleines Schaltbrett für Messzwecke an, um lose Drahtverbindungen nach

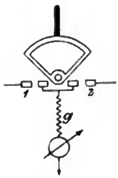


Fig. 64.

Möglichkeit zu vermeiden. Dabei sind zwischen den Leitern und den Messinstrumenten Hochspannungssicherungen einzuschalten. Eine derartige Anordnung unter Verwendung eines Hochspannungsschalters ist schematisch in Fig. 64 dargestellt. Legt man auf grosse Genauigkeit keinen Werth, so kann man als Vorschaltwiderstand für das Voltmeter einige in Reihe geschaltete Glühlampen verwenden. Die Aenderung des Widerstands der Lampen mit dem sie durchfliessenden Strom bringt dann einige Ungenauigkeit in die Messung hinein.

41. Gegen die Methode ist der Einwurf zu erheben, dass durch Erdung eines Leiters der andere Leiter sowie die Maschinen und Verbrauchsapparate ungebührlich stark gegen Erde beansprucht werden. Will man das vermeiden, so bietet sich nur der Ausweg dar, regelmässig das Potential zwischen jedem Leiter und Erde mittels eines elektrostatischen Voltmeters zu messen. Auf die Bestimmung des wirklichen Isolationswiderstandes muss man dann verzichten. Indessen ist der Fehlerwiderstand eines einzelnen Leiters dem

Potential des anderen Leiters gegen Erde verkehrt proportional. Für ein Zweileitersystem gelten nämlich bei Anwendung eines elektrostatischen Voltmeters die Gleichungen:

$$P_1 = \frac{V \frac{1}{f_2}}{\frac{1}{F}}, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (66\,a)$$

$$P_2 = \frac{V \frac{1}{f_1}}{\frac{1}{F}}, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (66\,b)$$

wo die Bedeutung der einzelnen Buchstaben die gleiche ist, wie früher. Dann folgt:

$$f_1 = \frac{V \, . \, F}{P_2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (67\,a)$$

$$f_2 = \frac{V \, . \, F}{P_1} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (67\,b)$$

Es ist leicht ersichtlich, dass die Grösse F aus den Gleichungen nicht zu bestimmen ist; aus einer Kombination dieser Gleichungen ergiebt sich nur die evidente Beziehung

$$P_1 + P_2 = V. \quad \ldots \ldots \ldots \quad (68)$$

42. Der Isolationsmesser von Hartmann & Braun, der bereits auf S. 65 beschrieben und in Fig. 46 abgebildet war, wird gleichfalls in einer für Messungen an Hochspannungsnetzen geeigneten Form hergestellt. Das Hochspannungsinstrument unterscheidet sich von dem für Niederspannung durch bessere Isolation und höheren Widerstand. Das Instrument für 1000 Volt Betriebsspannung hat einen Messbereich von 1 Megohm bis 30 000 Ohm, das für 2000 Volt einen solchen von 2,7 Megohm bis 150 000 Ohm. Der Widerstand der Spule des letzteren beträgt etwa 16 000 Ohm, wozu noch ein Vorschaltwiderstand von 100 000 Ohm kommt. Für die Ausführung der Messungen gelten im Uebrigen dieselben Bemerkungen, die schon bei der Beschreibung des Niederspannungsinstruments gemacht worden sind. Auch die zur Berechnung der einzelnen Fehlerwiderstände anzuwendenden Formeln bleiben die gleichen. Wenn der hochgespannte Gleichstrom wesentlich zu Beleuchtungszwecken benutzt wird, in Verbindung mit Gleichstromumformern, so wird der nor-

male Isolationswiderstand des Netzes und der Anschlüsse in der Regel höher als ein oder zwei Megohm sein, so dass dann das Instrument entsprechend den Bemerkungen auf S. 66 in der That ein direkt zeigender Isolationsmesser wird. Bei 2000 Volt Betriebsspannung findet gewöhnlich ein Durchschlagen des Kabels statt, bevor der Widerstand des Fehlers kleiner als ein Megohm geworden ist, bei 1000 Volt ist das nicht unbedingt der Fall. In Bogenlampenserienstromkreisen walten gerade die entgegengesetzten Verhältnisse ob, hier ist der normale Isolationswiderstand in der Regel viel geringer als ein Megohm. Für die Messungen an solchen Netzen bedient man sich daher lieber der Voltmetermethode von Frisch, zumal die Formel für die Berechnung des Isolationswiderstandes bequemer ist.

43. Wechselstromhochspannungsnetze. In Wechselstromhochspannungsnetzen ist die Bestimmung des Isolationszustandes durch einfache Messungen im Allgemeinen nicht auszuführen, weil die in Folge der höheren Spannung schon bei geringerer Ausdehnung des Netzes beträchtlichen Ladeströme die Isolationsmessungen stören. Für Hochspannungsnetze gilt demnach in erhöhtem Maasse das für Wechselstromniederspannungsanlagen in § 36 Gesagte. Theoretisch könnte man ja eine Messung mit übergelagertem Gleichstrom ausführen, indessen würde dieses Verfahren in der Praxis zu gefährlich werden. Man muss daher im Allgemeinen auf eine Messung und zahlenmässige Bestimmung der Isolationswiderstände während des Betriebes Verzicht leisten und sich eine Orientirung über den Zustand der Isolation dadurch verschaffen, dass man zunächst das Potential der einzelnen Leiter gegen Erde misst, wenn dieselben anerkanntermassen in gutem Zustande sind, und dann die Messung täglich wiederholt. Bleibt das Netz in Ordnung, so müssen die erhaltenen Werthe der Potentiale stets die gleichen sein. Aus der Grösse des Potentials der einzelnen Leiter lässt sich auch nicht, wie in einem Gleichstromnetz, auf die Fehlerwiderstände der einzelnen Leiter schliessen, da eben diese Potentiale in hohem Maasse von der Kapacität der Leiter abhängen. Ist das Potential eines Leiters immer nahezu Null, so folgt daraus noch keineswegs, dass seine Isolation schlecht ist. Hat ja doch, wie schon oben bemerkt, der äussere Leiter eines gut isolirten koncentrischen Kabelnetzes in der Regel ein ausserordentlich niedriges Potential gegen Erde. Wenn indessen eines Tages das Potential eines Leiters viel niedriger geworden ist wie es vorher war, und man gleichzeitig eine Steige-

rung im Potential des anderen Leiters wahrnimmt, so ist mit ziemlicher Sicherheit auf das Vorhandensein eines Fehlers in dem ersten Leiter zu schliessen.

Wenn eine neue Abzweigung dem Netz zugeschaltet wird, so können sich die relativen Potentiale der Leiter infolge der auftretenden Aenderung der Kapacitätsverhältnisse ebenfalls beträchtlich ändern. Eine neue Kabelstrecke wird indessen, bevor sie ständig mit dem Netz verbunden wird, mit einer, die Betriebsspannung beträchtlich übersteigenden Spannung geprüft, so dass man sicher ist, dass die neuen Ablesungen nicht in dem Auftreten von Fehlern begründet sind. Dieselben sind daher jetzt als die ordnungsmässigen, die das Netz bei normalem Zustande haben muss, anzusehen, so lange bis wieder ein neuer Abschnitt an das Netz angeschlossen wird.

Einen besonderen Fall bieten noch solche Drehstromkabelnetze dar, die einen neutralen Punkt besitzen, also in Sternschaltung angeordnet sind. Dieser neutrale Punkt hat stets dann das Potential Null gegen Erde, sobald die Kapacitäten und die Isolationswiderstände der drei Leiter gleich sind. Ein zwischen neutralen Punkt und Erde gelegtes Voltmeter wird also unter diesen Umständen keinen Ausschlag ergeben. Die Kapacitäten der Einzelleiter in einem Drehstromnetz sind wohl im Allgemeinen, wenn das Netz aus dreifach verseilten Kabeln besteht, als nahezu gleich anzusehen, so dass durch Verschiedenheiten dieser eine Störung nicht zu befürchten ist. Tritt jedoch in einem der Leiter ein Isolationsfehler auf, so wird das im neutralen Punkt durch das Zusammenwirken der drei phasenverschobenen Spannungen vorher bestandene Gleichgewicht erheblich gestört und das Voltmeter zeigt eine gewisse Spannungsdifferenz an. Um nun auch zu erkennen, in welchem der drei Leiter der Isolationsfehler liegt, ist es allerdings nöthig, ausserdem die Spannung jedes einzelnen Leiters gegen Erde zu messen. Den Leiter, der die geringste Spannungsdifferenz gegen Erde zeigt, wird man als den schuldigen betrachten können.

44. Die Messung des Potentials der Leiter gegen Erde kann auf verschiedene Weise erfolgen.

Schaltet man ein elektrostatisches Voltmeter zwischen jeden Leiter und Erde, so hat man den Vortheil, das Instrument stets an das Netz angeschlossen lassen zu können. Man braucht stets nur das Potential eines Leiters gegen Erde zu messen, da die Summe

der Potentiale beider Leiter nach Gleichung 68 gleich der Betriebsspannung ist, falls der Isolationswiderstand des Voltmeters gross ist gegen den des Netzes.

Sehr zu empfehlen ist die Anwendung eines Messtransformators, dessen Hochspannungswickelung zwischen Netz und Erde gelegt wird, während die Klemmen der Niederspannungswickelung mit einem Niederspannungsvoltmeter verbunden werden (Fig. 65). Bei einer solchen Anordnung kann man für die Messung sich eines Instruments mit grösserem Messbereich bedienen. Ein derartiges Volt-

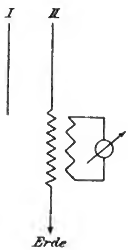


Fig. 65.

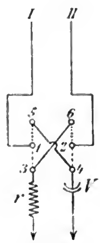


Fig. 66.

meter kann direkt auf dem Schaltbrett montirt werden, während der Messtransformator sich im Transformatorenraum befindet.

Man kann auch unter Verwendung der in Fig. 64 angegebenen Schaltung sich eines elektromagnetischen oder Hitzdrahtvoltmeters in Serie mit einem grossen Widerstande bedienen, den man sich aus einer Reihe von Glühlampen herstellen kann. Bei diesen Messungen ist, um vergleichbare Werthe zu erhalten, darauf zu achten, dass man sich stets desselben Widerstandes und desselben Instruments für denselben Leiter bedient.

Zuweilen wird noch eine andere Schaltung in Verbindung mit einem statischen Voltmeter angewendet, die sich insbesondere für koncentrische Systeme gut eignet. Man legt nämlich, während man mittels des elektrostatischen Voltmeters die Spannung des einen Leiters gegen Erde misst, den anderen Leiter über einen Widerstand r an Erde. Dann vertauscht man mittels eines Stromwenders, wie er in Fig. 66 schematisch angedeutet ist, Widerstand und Voltmeter und

macht die Ablesung am anderen Leiter. Gegen diese sowohl wie die beiden vorhergehenden Methoden lässt sich der Einwand erheben, dass man durch Erdung eines Leiters den anderen Leiter sowie die Maschinen über Gebühr gegen Erde beansprucht.

45. In solchen Fällen, wo der Ladestrom des Netzes nur einen so geringen Werth hat, dass er die Angaben des statischen Voltmeters nicht merklich beeinflussen kann, lässt sich die in Fig. 66 angegebene Schaltung auch zur zahlenmässigen Bestimmung des Isolationswiderstandes benutzen. Es ist nämlich, wie aus den in § 20 mitgetheilten Betrachtungen leicht folgt, das Potential des Leiters *II* gegen Erde, wenn *I* durch den Widerstand *r* geerdet wird:

$$P_{II} = \frac{V\left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{r}\right)}{\frac{1}{F} + \frac{1}{r}} \quad \text{. . . . . . . (69a)}$$

Bei Vertauschung von Voltmeter und Widerstand wird das Potential des Leiters *I*:

$$P_I = \frac{V\left(\frac{1}{f_2} + \frac{1}{r}\right)}{\frac{1}{F} + \frac{1}{r}} \quad \text{. . . . . . . (69b)}$$

Hierbei ist V die Betriebsspannung, f_1, f_2, F die Fehlerwiderstände der einzelnen Leiter resp. der Isolationswiderstand des gesammten Netzes. Zwischen den letztgenannten Grössen besteht die Beziehung:

$$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{F}.$$

Addirt man die Gleichungen (69a) und (69b), so erhält man:

$$P_I + P_{II} = V \frac{\frac{1}{F} + \frac{2}{r}}{\frac{1}{F} + \frac{1}{r}} \quad \text{. . . . . . . (70)}$$

und daraus nach einigen leichten Rechnungen:

$$F = \frac{P_I + P_{II} - V}{2V - (P_I + P_{II})}\, r. \quad \text{. . . . . . (71)}$$

Auf diese Weise wäre also durch zwei Ablesungen mittels statischen Voltmeters unter Zugrundelegung der obigen Annahmen der Isolationswiderstand des Netzes zu bestimmen.

46. Eine ungefähre Orientirung über das Verhältniss des Isolationszustandes der Leiter eines Netzes zu einander lässt die Prüfung mittels einer elektrodenlosen Vakuumröhre zu. Ein Ende der Röhre wird in die Hand genommen oder sonst an Erde gelegt, das andere gegen den zu prüfenden Leiter gehalten. Diese Methode ist indessen nur für solche Netze zu benutzen, in denen verseilte Kabel verlegt sind, für die Prüfung koncentrischer Kabel eignet sie sich nicht. Bei verseilten Kabeln sind die normalen Fehlerwiderstände der Leiter und ihre Kapacitäten nahe gleich. Die Leiter haben daher



Fig. 67.

unter normalen Verhältnissen auch gleiche Potentialdifferenzen gegen Erde, und die Vakuumröhre wird, zwischen einen der Leiter und Erde geschaltet, aufleuchten. Bricht nun ein Fehler in einem der Leiter aus, so wird die Röhre an diesem Leiter weniger hell, an dem anderen intensiver leuchten wie zuvor. In einem System koncentrischer Kabel hingegen ist das normale Potential des Aussenleiters viel geringer als das des inneren Leiters, und infolgedessen wird die Röhre bei Verbindung mit dem äusseren Leiter in keinem Falle aufleuchten, mag derselbe fehlerhaft sein oder nicht.

47. Der Cardew-Isolationsmesser (Drake & Gorham) ist eine Kombination von zwei elektrostatischen Voltmetern oder Goldblattelektroskopen. Dieselben sind nicht direkt in Volt getheilt

geben also nur eine relative Orientirung über den Zustand der Leiter. Das Instrument ist in Fig. 67 abgebildet. Mit jedem Leiter wird eine Platte verbunden, gegen die sich eine dünne Zinnfolie lehnt, die an dem oberen Rande der Platte befestigt ist. Das Gehäuse des Instruments liegt an Erde. Sind die Elektroskope an die Hochspannungsleitungen angeschlossen, so werden die Zinnfolien von den Platten abgestossen, und die Grösse des Ausschlags giebt ein relatives Maass für das Potential des betreffenden Leiters. Das Instrument kann auch eventuell mit einem Widerstand und einer Umschaltevorrichtung verbunden werden, so dass es zum Gebrauch für die in den §§ 44 und 45 beschriebenen Methoden geeignet wird.

Viertes Kapitel.

Allgemeine Methoden der Fehlerbestimmung.

48. Schleifenmethoden. Die Anwendung der Schleifenmethoden zur Fehlerbestimmung ist beschränkt auf diejenigen Fälle, in denen eine vollkommen geschlossene Kabelleitung von der Prüfstelle zu dem fehlerhaften Kabel hin und wieder vom anderen Ende derselben zu ersterer zurück zur Verfügung steht. Eine derartige Leitung nennt man eine Schleife. Die verschiedenen Kabelstücke, aus denen die Schleife zusammengesetzt ist, brauchen nicht denselben Querschnitt zu haben, es ist nur erforderlich, dass zwei verschiedene, von einander unabhängige Leitungen mit gutem Isolationswiderstande von der Messstelle zu dem Fehlerort führen. Der einfachste Weg, eine solche Schleife zu bilden, besteht darin, das eine Ende des fehlerhaften Kabels mit seinem Nachbarkabel zu verbinden und vom andern Ende aus die Messung vorzunehmen. Indessen ist es nicht immer angebracht und auch nicht nothwendig, zur Erlangung der erforderlichen Schleife einen Kurzschluss zwischen zwei Kabeln resp. in Mehrfachkabeln einen solchen zwischen zwei Leitern desselben Kabels herzustellen.

In einem Leiternetz, wie es in Fig. 68 dargestellt ist, kann man die Schleife auf eine der folgenden Weisen bilden, wenn die Messung von der Centrale aus erfolgen soll:

$$b_2\,B_2\,B_3\,b_3$$
$$b_2\,B_2\,B_4\,b_4$$
$$b_1\,B_1\,B_3\,b_3$$
u. s. f.

Man kann auch G und H mit einander verbinden und die Schleife herstellen aus:

$$a_1\,G\,H\,b_1$$
$$a_2\,G\,H\,b_2$$

Verbindet man in der Abzweigung die Punkte R, S mit einander, so würde sich etwa die Schleife ergeben:

$$a_4\,A_4\,M\,Q\,S\,R\,P\,N\,B_2\,b_2.$$

Ein Ringleitungsnetz ist schematisch in Fig. 69 dargestellt, wo die Punkte A, B, C... Hausanschlüsse bedeuten. Ein derartiges

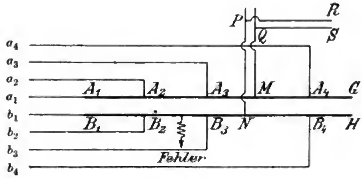


Fig. 68.

Vertheilungsnetz, wie es vielfach bei Hochspannungssystemen benutzt wird, liefert sehr bequeme Schleifen. Hat man ein Ringsystem mit Speiseleitungen (Fig. 70), wie es bei Niederspannungsanlagen oft verwandt wird, so kann man die Fehlerbestimmungen mittels zweier

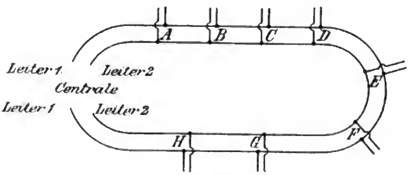


Fig. 69.

Speiseleiter von gleicher Polarität anstellen, wenn man vorher die Kontinuität der Ringleitung an irgend einem Punkte unterbrochen hat.

Der Einfachheit halber sind in den Figuren die Verhältnisse an Zweileitersystemen erläutert.

Wie man bei der Herstellung einer Schleife im Einzelnen am zweckmässigsten zu verfahren hat, muss man von Fall zu Fall entscheiden, wobei einerseits das Bestreben maassgebend sein soll, die

Schleife so zu wählen, dass sie weder unnöthig lang wird, noch aus allzuvielen Kabelstücken besteht, andererseits die nothwendigen Trennungen und Verbindungen von Leitungen in der Weise vorzunehmen, dass der Betrieb möglichst wenig gestört wird.

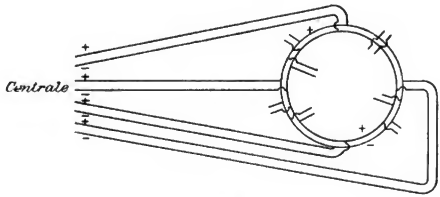


Fig. 70.

49. Wenn die Schleife aus mehreren Kabellängen von verschiedenem Querschnitt besteht, so erleichtert man sich die Berechnung des Fehlerortes, wenn man die Länge der Schleife zurückführt auf die bezüglich des Leitungswiderstands äquivalente Länge eines Kabels von demselben Querschnitt, wie ihn das fehlerhafte Kabel hat. Man muss also dann anstatt der wirklichen Länge der Schleife diejenige Länge einführen, bei der ein Kabel von dem Querschnitt und der Leitungsfähigkeit des fehlerhaften Kabels denselben Widerstand haben würde, wie ihn die Schleife hat. Sind a und b die Querschnitte zweier Leitungen A und B, so ist die Länge von B, die denselben Widerstand wie die Längeneinheit von A haben würde: $\frac{b}{a}$. Das folgende Beispiel möge den Gang einer solchen Rechnung erläutern:

Eine Schleife bestehe aus 300 m Kabel von 400 qmm, 100 m von 500 qmm, 120 m von 240 qmm und 600 mm von 400 qmm Querschnitt. In dem durch das Kabelstück von 500 qmm Querschnitt gebildeten Abschnitt der Strecke, befinde sich der Fehler (vgl. Fig. 71). Dann ergiebt sich die Länge des Kabels von 500 qmm, die denselben Widerstand haben würde wie 300 m von 400 qmm zu

$$\frac{300 \cdot 500}{400} = 375 \text{ m.}$$

Das 120 m lange Stück Kabel von 240 qmm ist äquivalent einer Länge

$$\frac{120 \cdot 500}{240} = 250 \text{ m von } 500 \text{ qmm},$$

und das letzte 600 m lange Stück von 400 qmm einer Länge von:

$$\frac{600 \cdot 500}{400} = 750 \text{ m von } 500 \text{ qmm}.$$

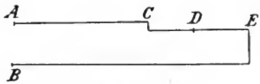


Fig. 71.

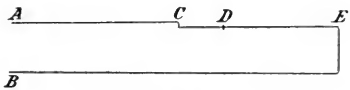


Fig. 72.

Die Längenverhältnisse der reducirten Kabelschleife sind in Fig. 72 dargestellt. Die Gesammtlänge der Schleife, die für die Berechnung in Betracht zu ziehen wäre, ist demnach:

$$375 + 100 + 250 + 750 = 1475 \text{ m}.$$

Ergiebt sich aus der Fehlerbestimmung das Resultat, dass der Ort der Fehlers 425 m von dem Ende A entfernt ist, so beträgt der Abstand des Fehlers von C, dem Anfang der fehlerhaften Strecke:

$$425 - 375 = 50 \text{ m}.$$

Wenn von vornherein noch nicht bekannt ist, welches Kabelstück den Fehler enthält, so wird die Länge der Schleife zurückgeführt auf die äquivalente Länge, bezogen auf das Kabel mit dem stärksten Querschnitt. Es sei z. B. in der betrachteten Schleife ein Fehler aufgetreten, ohne dass man indessen weiss, in welchem Kabel sich derselbe befindet. Demgemäss bezieht man alle Längen auf den stärksten in der Schleife vorhandenen Querschnitt von 500 qmm. Die Lage des Fehlers ergebe sich aus der Messung 1200 m vom Ende A entfernt. Dann liegt der Fehler augenscheinlich auf der Kabelstrecke $E\,B$ und in dem äquivalenten Abstande

$$1200 - 375 - 100 - 250 = 475 \text{ m}$$

von E. Da aber der Abschnitt EB nur einen Querschnitt von 400 qmm hat, während bei der Berechnung der äquivalenten Länge 500 qmm angenommen war, so ist der wirkliche Abstand des Fehlers von E:

$$475 \cdot \frac{400}{500} = 380 \text{ m.}$$

Wenn im Folgenden von der Länge einer Kabelschleife und von dem Abstande des Fehlers von einem Kabelende aus gesprochen wird, so ist darunter stets die äquivalente Länge in dem bezeichneten Sinne zu verstehen.

50. Murray's Schleifenmethode. Diese schon früher in ihren Grundzügen auseinandergesetzte Methode beruht auf dem Princip

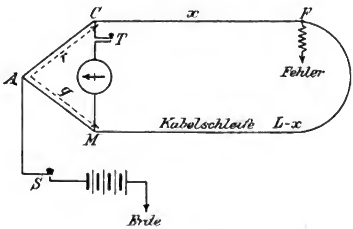


Fig. 73.

der Wheatstone'schen Brücke. Das fehlerhafte Kabel resp. Kabelstück bildet eine Schleife oder den Theil einer solchen und wird als solche in eine Wheatstone'sche Brücke eingeschaltet. Dabei entspricht die Schleife zwei Widerständen in der Brücke, deren einer aus dem Theil der Schleife von ihrem Anfang bis zum Fehler und deren anderer aus dem Theil vom Fehler bis zum Ende der Schleife gebildet wird. Zur Ergänzung der Brücke kann man sich entweder eines ausgespannten Messdrahtes oder eines Widerstandskastens bedienen. In ersterem Falle, der in Fig. 73 dargestellt ist, werden die beiden noch fehlenden Widerstände gebildet aus den durch den Schleifkontakt A getrennten beiden Theilen des Schleifdrahtes, im zweiten Falle (Fig. 74) wird einer der Vergleichswiderstände des Kastens durch Einstecken aller Stöpsel ausgeschaltet, während der andere und der variable Widerstand die Brückenanordnung vervollständigen.

Ueber die Methode und Ausführung der Messung ist früher bereits berichtet worden, es erübrigt noch, auf einige Einzelheiten hier einzugehen. Die Zuleitungsdrähte vom Instrument zur Kabelschleife sind so kurz wie irgend möglich zu machen. Sie sind als Theil der Schleife aufzufassen, und deswegen müssen ihre äquivalenten Längen bei der Bestimmung der äquivalenten Länge der Schleife mit in Rechnung gezogen werden. Habe z. B. das fehlerhafte Kabel einen Querschnitt von 50 qmm, und man benutze als Zuleitungsdraht zu jedem Ende der Schleife je 1 m Draht von 1,5 qmm Querschnitt, so beträgt die äquivalente Länge der Zuleitungsdrähte je $\frac{50}{1,5} = 33,3$ m; dieser Werth ist an jedem Ende der Länge des Kabels zuzuzählen.

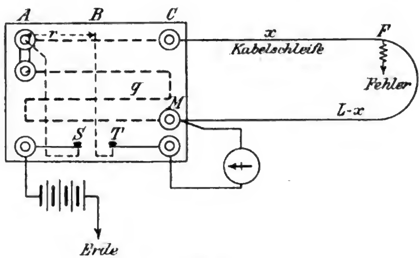


Fig. 74.

Ein kleiner Fehler kann bei dieser Art der Berechnung dann entstehen, wenn die Temperatur des Kabels von der der Zuleitungsdrähte beträchtlich verschieden ist. Für je einen Grad Celsius Temperaturdifferenz ändert sich die äquivalente Länge der Zuleitungsdrähte um 0,4 %. Alles in allem beträgt jedoch die äquivalente Länge der Zuleitungsdrähte meist nur einen kleinen Bruchtheil der Länge der ganzen Schleife, so dass die Temperaturkorrektion im Allgemeinen zu vernachlässigen sein wird. Zudem lässt sich die wahre Temperatur des Kabels nur schätzungsweise ermitteln. Will man indessen bei langen Zuleitungsdrähten und bei beträchtlicher Temperaturdifferenz auf die diesbezügliche Korrektion nicht verzichten, so kann man zur genauen Ermittelung derselben folgenden Weg einschlagen: Man misst zunächst den Widerstand L der ganzen Schleife (Kabel und Zuleitungsdrähte), ausserdem die Widerstände der Zu-

führungsdrähte einzeln (m, c). Ist dann l' die äquivalente Länge der Schleife ohne Zuführungsdrähte, so sind die äquivalenten Längen der Zuleitungsdrähte, wie sie zur genauen Berechnung der Länge der Schleife und der Lage des Fehlers einzusetzen sind, gegeben durch:

$$\Delta_1 = \frac{l'}{L - m - c} m \quad \text{und} \quad \Delta_2 = \frac{l'}{L - m - c} c. \quad . \quad (72)$$

Wesentlich unabhängiger von dem Einfluss der Zuleitungsdrähte macht man sich, wenn man bei Messungen mit Widerstandskasten das Galvanometer nicht an die Klemmen der Wheatstone-Brücke selbst, sondern direkt an die Kabelschleife anlegt, indem man vom Messraum noch zwei weitere Zuleitungen für das Galvanometer bis an die Kabelschleife heranführt. Die Schaltung wäre dann nach

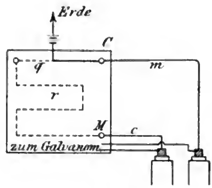


Fig. 75.

Fig. 75 auszuführen. Die Zuleitungsdrähte bilden jetzt nicht mehr einen Theil der Kabelschleife, sondern ihr Widerstand addirt sich nunmehr zu den Widerständen q, r des Widerstandskastens, indem q um den Widerstand m der einen, r um den Widerstand c der anderen Zuleitung vermehrt wird. Hat man ein für allemal den Widerstand der für die Zuleitungen zu verwendenden Drahtsorte bestimmt oder noch besser, verwendet man stets dieselbe Zuleitung, so ist die an den Widerständen q, r anzubringende Korrektion auch stets die gleiche, unabhängig von dem Querschnitt des Kabels. Insbesondere bei kürzeren Kabelschleifen, wo die äquivalente Länge der Zuleitungsdrähte einen beträchtlichen Bruchtheil der Länge der Kabelschleife ausmachen würde, ist die Anordnung mit 4 Aussenleitungen vorzuziehen. Bequem ist es dann, je zwei gut isolirte Doppelleitungen zu verwenden, indem je ein Draht der Doppelleitung als Anschlussleitung der Schleife an die Brücke, der andere als Galvanometerleitung dient.

Die Beschaffenheit der Drähte im Batterie- und Galvanometerkreis ist unwesentlich, da die Widerstände derselben keinen Einfluss auf das Resultat ausüben. Das Galvanometer soll möglichst empfindlich sein. Als Batterie wählt man einige kleine Akkumulatoren oder Trockenelemente. Hat der Fehler einen hohen Widerstand, so muss man eine grössere E.M.K. anwenden, um einen noch hinreichend starken Strom durch ihn hindurch zu treiben. Beträgt der Fehlerwiderstand 1000 Ohm oder mehr, so kann man unbedenklich etwa 50 Akkumulatoren oder sogar eine Dynamomaschine als Stromquelle benutzen. Zum Schutz für Brückenwiderstände, Schleifdraht und Galvanometer schaltet man zweckmässig eine feine Abschmelzsicherung in den Batteriekreis. Es erweist sich auch als angebracht, einen Widerstand, etwa einige Lampen, in die Erdleitung der Akkumulatorenbatterie oder der Maschine zu legen, anstatt diese direkt zu erden.

Wird die Messung mit einem Widerstandskasten etwa der in Fig. 74 dargestellten Form vorgenommen, so sind die Verbindungen etwas anders wie bei gewöhnlichen Widerstandsmessungen, insbesondere tauschen Batterie- und Galvanometerschlüssel ihre Rollen. Der Gang einer Fehlerbestimmung dieser Art wäre etwa der folgende: Zunächst seien zwischen A und B 1000 Ohm eingeschaltet. Der Batterieschlüssel S wird geschlossen und darnach am Galvanometerschlüssel T für einen Augenblick Kontakt gegeben, um zu sehen, in welcher Richtung die Galvanometernadel ausschlägt, wenn der Widerstand q in dem Zweige $A\,M$ kleiner oder grösser ist als erforderlich. Diese Beobachtung lässt dann schon aus der Richtung des Galvanometerausschlags erkennen, in welchem Sinne man q zu verändern hat. Dies geschieht so lange, bis man am Galvanometer keinen Ausschlag mehr erhält. Im letzten Stadium der Abgleichung kann der Batterieschlüssel ständig geschlossen sein. Wenn nach Einschaltung des gesammten verfügbaren Widerstandes $A\,M$ die Richtung des Galvanometerausschlages noch immer auf die Einschaltung eines höheren Widerstandes hinweist, so zieht man den Stöpsel ∞. Kehrt sich auch dann die Richtung des Ausschlags noch nicht um, so war die Schaltung unrichtig. Veranlasst indessen die Einschaltung des Widerstands ∞ den Galvanometerausschlag zur Umkehr, so muss man, nachdem der Stöpsel ∞ wieder eingeschaltet ist, mit einem kleineren Vergleichswiderstand $q = 100$, eventuell auch noch mit $q = 10$ den Versuch wiederholen. Wird auch jetzt noch keine

Gleichgewichtslage erzielt, so liegt der Fehler ganz nahe am Ende C. Man vertauscht dann die Verbindungen der Kabelschleife mit der Brücke, macht $r = 1000$ und stellt $A\,M$ nunmehr auf Brückengleichgewicht ein.

Die Formel für den Abstand des Fehlers von dem mit C verbundenen Ende der Schleife ist:

$$x = \frac{r}{r+q}\,l, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (73)$$

wo l die Länge der Schleife ist.

Ist l in m gegeben, so erhält man auch x in m.

In dem Falle, dass das Galvanometer an der Kabelschleife direkt anliegt, man also 4 Zuleitungen an die Schleife führt, hat man zu q und r die Widerstände der Zuleitungsdrähte von der Kabelschleife zur Brücke zu addiren. Sind diese bezüglich m und c, so ist:

$$x = \frac{r+m}{r+q+m+c}\,l \quad \ldots\ldots\ldots \quad (73a)$$

der genaue Abstand des Fehlers vom Punkte C.

Wenn eine Wheatstone'sche Brücke mit Schleifdraht benutzt wird ($C\,A\,M$ in Fig. 73 stelle den Schleifdraht dar), so ist der Schlüssel S durch den Schleifkontakt ersetzt. Die Lage des Schleifkontakts wird geregelt, bis beim Niederdrücken des Galvanometertasters keine Ablenkung mehr erhalten wird. Ist s die Gesammtlänge des Schleifdrahtes $C\,A\,M$, dessen Nullpunkt in C liege, und r die Länge des Stückes $C\,A$, wenn Gleichgewicht erreicht ist, so ist der Abstand x des Fehlers vom Ende C:

$$x = \frac{r}{s}\,l.$$

l bezeichnet wiederum die gesammte Länge der Kabelschleife.

Benutzt man die vom Verfasser konstruirte Brücke, bei der ausser A (in Fig. 73) auch der Endkontakt M verschiebbar angeordnet ist, so kann, falls man letzteren auf den der Schleifenlänge entsprechenden Skalentheil einstellt, die Entfernung des Fehlers vom Kabelanfang C direkt am Schleifkontakt A abgelesen werden (vgl. S. 12 und S. 14).

Es erweist sich immer zweckmässig, die Verbindungen von der Schleife zur Brücke zu vertauschen und als Probe auf die erste noch

eine zweite Messung vorzunehmen. Sind die aus beiden Messungen sich ergebenden Lagen des Fehlers nur um wenige Meter verschieden, so hat man die mittlere Lage als wahren Fehlerort anzusehen. Ist eine beträchtliche Differenz zwischen den Angaben beider Messungen vorhanden, so sind die Verbindungen nachzusehen und alle Kontakte zu sichern. Der Fehler, den Uebergangswiderstände hervorrufen, und die Methode, solche Fehler zu umgehen, werden später noch besprochen werden.

51. Beispiel 1. Ein zweifach koncentrisches Kabel von 70 qmm Querschnitt und 110 m Länge hat in seinem äusseren Leiter einen Fehler. Die beiden Leiter hatten, wie man aus früheren Messungen wusste, gleichen Widerstand. Das Kabel wurde von den Transformatoren abgeschaltet, an einem Ende kurz geschlossen, und dann die Fehlerbestimmung vom anderen Ende aus vorgenommen. Zur Messung wurde ein Widerstandskasten und ein Reflexgalvanometer benutzt. Da das Galvanometer in der nächsten Nähe des Kabels aus Mangel an einem passenden Platze nicht aufgestellt werden konnte, so wurden von der Brücke zur Kabelschleife 4 Leitungen von je 3 m Länge gelegt, von denen in der oben erläuterten Weise zwei zum Anschluss der Kabelschleife an die Brücke, zwei zur Verbindung der Galvanometer mit den Enden der Schleife dienten. Der Querschnitt der Zuleitungsdrähte war 2 qmm; der Widerstand eines jeden betrug 0,026 Ohm. Dieser Werth kann unbedenklich vernachlässigt werden. Die Verbindungen waren derart gemacht, dass der äussere Leiter des Kabels an C, der innere an M angeschlossen war. Die gesammte Länge der Kabelschleife betrug 220 m. Zuerst wurde in den Zweig AB der Widerstand $r = 1000$ Ohm eingeschaltet. Es zeigte sich, dass bei dieser Wahl die Empfindlichkeit der Brücke zu gering war, da der Werth von q für Brückengleichgewicht sich unter diesen Umständen noch nicht auf 40 Ohm genau bestimmen liess. Daraufhin wurde der Widerstand des Armes AB zu 100 Ohm angenommen. Nunmehr erhielt man Brückengleichgewicht bei $q = 141$ Ohm. Nach Vertauschung der Zuleitungen hatte man zur Erreichung des Gleichgewichts $q = 73$ Ohm zu stöpseln.

Aus der ersten Messung berechnet sich der Abstand des Fehlers vom Punkte C zu:

$$\frac{100}{141 + 100} \cdot 220 = 91 \text{ m.}$$

Aus der zweiten Messung folgt:

$$\frac{100}{73+100} \cdot 220 = 127 \text{ m.}$$

Da die ganze Schleife 220 m lang ist, so giebt die letztere Messung den Abstand des Fehlers vom Punkte C zu

$$220 - 127 = 93 \text{ m an.}$$

Als wahrscheinlichen Abstand des Fehlers vom Punkte C kann man daher 92 m annehmen und dort das Kabel behufs Ausbesserung des Fehlers öffnen.

Beispiel 2. Eine Schleife von 200 m Länge, bestehend aus einem Kabel von 150 qmm Querschnitt, hat einen Fehler von niedrigem Widerstande. Zur Verfügung standen keine weiteren Instrumente als ein Reflexgalvanometer und ein gewöhnlicher Schlüssel. Die Fehlerbestimmung wurde in der folgenden Weise ausgeführt.

Ein 1 mm starker Stahldraht von etwa 3 m Länge wurde zwischen den Enden der Schleife straff ausgespannt und mit diesen selbst verlöthet. Die zum Galvanometer führenden Drähte waren an denselben Stellen ebenfalls angelöthet. Ein Pol der Batterie war an Erde gelegt und der andere mit einem Drahte verbunden, dessen Ende zu einem Haken gebogen auf dem Stahldraht schleifte. Der Schleifkontakt wurde so lange verschoben, bis die Gleichgewichtslage erreicht war. Der Abstand dieses Punktes von dem näheren Ende des Kabels, mit einem Bandmaass gemessen, betrug 1527 mm, die Länge des ganzen, zwischen den Kabelenden ausgespannten Drahtes 3126 mm. Dann ist der Abstand des Fehlers von dem dem Gleichgewichtspunkte näheren Kabelende:

$$\frac{1527}{3126} \cdot 200 = 97{,}6 \text{ m.}$$

52. Varley's Schleifenmethode. Das Schema dieser Methode ist in der Fig. 76 dargestellt. Die Methode erfordert die Verwendung eines Widerstandskastens, ein Schleifdraht allein reicht nicht aus.

Die Verbindungen werden zunächst nach Fig. 76 hergestellt. Sie entsprechen völlig denen bei der gewöhnlichen Widerstandsmessung mit der einen Ausnahme, dass ein Pol der Batterie an Erde liegt, anstatt mit dem Punkte M verbunden zu sein. Als Proportionalwiderstände wählt man zweckmässig $b = 1000$, $a = 10$. Diese Werthe entsprechen den in der Praxis am häufigsten vorkommenden Fällen.

Der Gang der Messung besteht dann darin, den Widerstand d so lange abzugleichen, bis sich die Brücke im Gleichgewicht befindet. Für den zweiten Theil der Messung wird der an Erde liegende Pol der Batterie von Erde abgenommen, statt dessen an den Punkt M angelegt und nunmehr der Kupferwiderstand L der ganzen Schleife in der üblichen Weise gemessen. Ist l die Länge der Kabelschleife, so lautet die Formel für den Abstand des Fehlers vom Punkte M:

$$x = \frac{l\,(b\,L - a\,d)}{L\,(b + a)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (74)$$

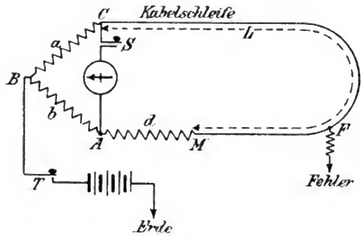


Fig. 76.

Die Grundgleichung der Wheatstone'schen Brücke liefert die Beziehung:

$$\frac{a}{b} = \frac{L - X}{X + d},$$

wenn unter X der Widerstand des Theiles der Schleife vom Punkte M bis zum Orte des Fehlers verstanden ist. Daraus folgt:

$$X\,b + X\,a = b\,L - a\,d$$

$$X = \frac{b\,L - a\,d}{b + a} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (74a)$$

Nun verhalten sich die Widerstände X des Stückes der Kabelschleife vom Punkte M bis zum Fehler zu dem Widerstande L der ganzen Schleife, wie die entsprechenden Längen:

$$X : L = x : l$$

$$X = \frac{x}{l}\,L.$$

Setzt man diesen Werth in Gleichung (74a) ein, so folgt, wie oben angegeben:

$$x = \frac{l\,(b\,L - a\,d)}{L\,(b + a)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (74)$$

Man hat also bei der Fehlerbestimmung nach Varley's Methode zwei gesonderte Messungen auszuführen, eine Widerstandsmessung mit einpolig geerdeter Batterie und die Messung des Kupferwiderstandes der Kabelschleife. Die erste Messung wiederholt man zweckmässig mit Vertauschung der Enden der Kabelschleife, und benutzt die aus beiden Einstellungen sich ergebenden Werthe zur Bildung eines Mittelwerthes.

Bei der obigen Rechnung war angenommen, dass die Zuleitungsdrähte bei der Berechnung der äquivalenten Länge der Kabelschleife mit einbezogen waren. Indessen kann man die Anrechnung der Zuleitungsdrähte auf die Kabelschleife auch hier umgehen; besonders rathsam und bequem ist das in den beiden Fällen, wo die Schleife in ihrer ganzen Länge aus Kabel von demselben Querschnitt besteht, und wo die Zuleitungsdrähte eine von dem Kabel verschiedene Temperatur besitzen. Nachdem man den Widerstand L von Schleife und Zuleitung zusammen gemessen hat, trennt man die Zuleitungsdrähte vom Kabel ab und misst den Widerstand jedes derselben für sich. Sei m der Widerstand der zum Punkte M, c der Widerstand der zum Punkte C führenden Leitung. Daraus bildet man die Grösse:

$$L' = L - m - c.$$

Die Formel für den Abstand des Fehlers vom Ende M des Kabels nimmt dann die Gestalt an:

$$x = \frac{l}{L'} \left(\frac{b\,L - a\,d}{b + a} - m \right), \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (75)$$

wo l nunmehr die Länge der Kabelschleife allein ohne Zuleitungsdrähte bedeutet. Der Beweis für Formel (75) ist im Anschluss an die oben gegebene Rechnung leicht zu führen. Man hat jetzt die Beziehung:

$$\frac{a}{b} = \frac{L - m - X}{X + d + m}.$$

Daraus folgt:

$$a X + a d + m a = b L - b X - b m$$

$$X = \left(\frac{b L - a d}{a + b} - m \right).$$

Ferner ist

$$\frac{X}{L'} = \frac{x}{b}.$$

Durch Kombination beider Gleichungen folgt:

$$x = \frac{l}{L'} \left(\frac{b L - a d}{a + b} - m \right).$$

53. Beispiel. Eines von zwei nebeneinander liegenden Kabeln, bestehend aus einer Litze von 7 Drähten à 1,22 mm Durchmesser, zeigte einen Fehler, während das andere intakt war. An dem von der Station entfernten Ende waren die Kabel an solche von $7 \times 0{,}915$ mm Durchmesser angeschlossen, und zwar mittels einer Kabelmuffe, so dass die Verbindungsstelle ohne Weiteres nicht zugänglich war. An der Station führten die erstgenannten Kabel bis zum Schaltbrett. Die verfügbaren Instrumente waren eine Wheatstone-Brücke und ein Spiegelgalvanometer. Die Länge jedes von den $7 \times 1{,}22$-Kabeln betrug 1240 m, die der $7 \times 0{,}915$-Kabel war je 4,57 m. Die äquivalente Länge der letzteren Kabel berechnete sich zu:

$$\frac{9{,}14 \,.\, 8{,}18}{4{,}60} = 16{,}2 \text{ m}.$$

8,18 qmm ist der Querschnitt des Kabels $7 \times 1{,}22$, 4,60 jener des Kabels $7 \times 0{,}915$.

Die gesammte Länge der Schleife wurde demgemäss angenommen zu $2480 + 16 = 2496$ m.

Die Enden des Kabels $7 \times 0{,}915$ waren mit einander verbunden, während die in der Centrale liegenden Enden der $7 \times 1{,}22$-Kabel nach dem Schema der Fig. 77 an die Brücke angeschlossen waren. Die Verbindungsdrähte zwischen Kabel und Brücke waren zwei Drähte von 2 mm Durchmesser und gleicher Länge.

Ausführung der Messung. Kabel 1 wurde an Punkt M angeschlossen, Kabel 2 an C. Als Proportionalwiderstände wurden gewählt

$$b = 1000 \quad a = 10.$$

Dann erhielt man Brückengleichgewicht für

$$d_1 = 467.4 \text{ Ohm.}$$

Der Kupferwiderstand der ganzen Schleife, eingeschlossen der Prüfdrähte, belief sich auf

$$L = 5{,}368 \text{ Ohm.}$$

Der Kupferwiderstand der beiden Zuleitungsdrähte zusammen betrug 0,042 Ohm. Nunmehr wurden die Enden der Schleifen ver-

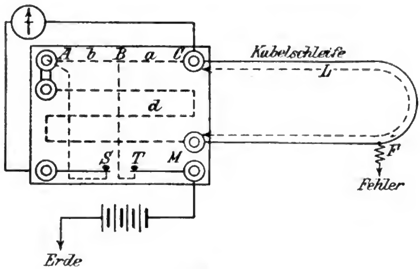


Fig. 77.

tauscht, Kabel 2 wurde an M, Kabel 1 an C angeschlossen. War wieder

$$b = 1000 \quad a = 10,$$

so ergab sich Gleichgewicht der Brücke für:

$$d_2 = 64{,}4 \text{ Ohm.}$$

Diese Messresultate sind in folgender Weise auszuwerthen: Der Widerstand der Kabelschleife ohne Zuleitungsdrähte ist

$$L' = 5{,}368 - 0{,}042 = 5{,}326 \text{ Ohm.}$$

Der Ausdruck

$$\frac{b\,L - a\,d_1}{b + a} = \frac{5368 - 4674}{1010} = \frac{694}{1010} = 0{,}687.$$

Davon ist nach Formel (75) abzuziehen der Widerstand der einen Zuleitung = 0,021, was 0,666 ergiebt.

Um den Abstand des Fehlers von der Centrale zu erhalten, ist diese Zahl zu multipliciren mit $\frac{l}{L'} = \frac{2496}{5{,}326}$. Dann ergiebt sich für

den Abstand des Fehlers von dem in der Centrale befindlichen Ende des Kabels 1:

$$\frac{2496}{5,326}\,0,666 = 313\text{ m.}$$

Aus dem nach Vertauschung der Enden der Kabelschleife vorgenommenen zweiten Versuch berechnet sich

$$\frac{b\,L - a\,d_2}{b + a} = \frac{5368 - 644}{1010} = 4,677.$$

Abzuziehen ist der Widerstand der einen Zuleitung = 0,021, wonach 4,656 verbleibt. Daraus folgt der Abstand des Fehlers von dem in der Centrale liegenden Ende des Kabels 2

$$\frac{4,656 \,.\, 2496}{5,326} = 2185\text{ m.}$$

Die Entfernung vom Ende 1, berechnet aus dem zweiten Versuch, ist gleich der Gesammtlänge der Schleife, vermindert um 2185 m, d. i. 2496 — 2185 = 311 m.

Als Ort des Fehlers wurde der aus den beiden Bestimmungen folgende Mittelwerth 312 m vom Ende 1 angenommen.

54. Bei Fehlerbestimmungen in Telegraphenleitungen und -kabeln stellt man zumeist auf den „falschen Nullpunkt“ ein. Dementsprechend wird bei diesen Messungen der Galvanometerschlüssel vor dem Batterieschlüssel geschlossen; bereits bei offenem Batteriekreis zeigt sich nämlich eine gewisse Ablenkung, die hauptsächlich von Erdströmen herrührt. Man ändert nun bei geschlossenem Batteriekreis die Verhältnisse in der Brücke so lange, bis diese Einstellung wieder erreicht ist, die man als das Kriterium für das Brückengleichgewicht ansieht.

In einer aus Starkstromkabeln gebildeten Schleife sind allerdings keine Erdströme vorhanden, indessen enthält trotzdem eine solche Schleife eine elektromotorische Kraft, die davon herrührt, dass sich an der Fehlerstelle selbst ein kleines galvanisches Element bildet. Die Elektroden des Elementes sind Kupfer und andererseits entweder Blei oder die verzinkten Eisendrähte oder Eisenbänder der Armirung des Kabels. Der Elektrolyt ist der feuchte Faserstoff oder direkt schmutziges Wasser. Wenn man die verschiedenen Schaltungen der Schleifenmethoden daraufhin prüft, sieht man, dass die aus diesen Ursachen entstehende elektromotorische Kraft regel-

mässig in dem Batteriekreise und nicht in einem der vier Brückenzweige wirkt. Es ist daher nicht nur unnöthig, die Brücke auf den falschen Nullpunkt einzustellen, sondern direkt falsch. Die Ablenkung, die man etwa beim Herabdrücken des Galvanometerschlüssels allein erhalten würde, ist lediglich bedingt durch Stromübergang von den Instrumenten zur Erde in Folge mangelhafter Isolation derselben. Man beseitigt diesen Uebelstand dadurch, dass man die Apparate sorgfältig abstaubt und dann die isolirenden Theile mit etwas Benzin abwischt. Macht sich trotzdem noch eine kleine Ablenkung am Galvanometer bemerkbar, so isolirt der Batterieschlüssel nicht ganz vollkommen. Da sich jedoch in diesem Falle der Leckstrom im Batteriezweige der Brücke befindet, so verschwindet er von selbst bei Brückengleichgewicht, ist also ohne Belang.

Wenn die Batteriedrähte zu nahe am Galvanometer vorbeigeführt sind, so kann in Folge der inducirenden Wirkung des Batteriestroms eine Galvanometerablenkung eintreten, wenn man den Batterieschlüssel öffnet und schliesst. Bei stärkeren Strömen ist auch eine dauernde Beeinflussung des Galvanometers durch das magnetische Feld des Stromes denkbar. Man beseitigt diese Störung durch weitere Entfernung der Batteriedrähte oder noch wirksamer, indem man Hin- und Rückleitung um einander wickelt, eventuell auch eine Doppelleitungsschnur anwendet.

Für Fehlerbestimmungen an Starkstromkabeln ist es in den meisten Fällen durchaus unzweckmässig, die Batterie zwischen die Enden der Kabelschleife und das Galvanometer in die den Fehlerwiderstand enthaltende Brückendiagonale zu legen, dadurch dass man gegenüber der üblichen Anordnung die Lage von Batterie und Galvanometer vertauscht. Abgesehen davon, dass dies in der Regel gegen den auf S. 7 gegebenen Satz über die grösste Empfindlichkeit der Brückenschaltung verstösst, erhält man auch stets beim Herabdrücken des Galvanometerschlüssels in Folge der am Fehlerort befindlichen E.M.K. einen Ausschlag, so dass man auf einen falschen Nullpunkt einzustellen hat, der sich überdies beständig ändert, da die E.M.K. des Fehlers von der durch ihn gehenden Stromstärke abhängt.

Diese Bemerkungen über den falschen Nullpunkt gelten nur dann, wenn die Schleife von dem unter Spannung befindlichen Theil des Netzes abgetrennt ist. Die Bedingungen für Fehlerbestimmungen während des Betriebes sind wesentlich andere und werden später eingehend erörtert werden.

Uebergangswiderstände sind so klein wie möglich zu machen, und, wenn unvermeidlich, an eine Stelle zu verlegen, wo sie möglichst wenig stören. Die meisten falschen Messungen bei Fehlerbestimmungen nach Schleifenmethoden sind auf zu hohe Uebergangswiderstände zurückzuführen. Alle Kabel-Enden sind sorgfältig zu reinigen, am besten jeder Draht der Litze für sich. Möglichst ist auch das Kabel direkt an die Brücke anzulegen. Zwei Fälle sind gemeinhin zu unterscheiden. Entweder ist der Widerstand des Kabelarmes kleiner oder er ist grösser als der Widerstand des anliegenden Armes der Brücke. Ersterer Fall ist der häufigere, indessen kann auch der letztere bei langen Kabelschleifen von schwachem Querschnitt und bei Anwendung eines Schleifdrahtes vorkommen.

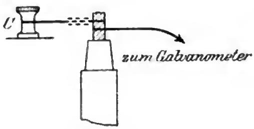


Fig. 78.

Im ersten Fall ist das Galvanometer nach Fig. 78 einzuschalten, so dass der Uebergangswiderstand sich nicht zu dem Kabelarm der Brücke addirt. Bei Verwendung eines Widerstandskastens ist es dann auch vortheilhaft, anstatt den am Instrument befindlichen Schlüssel zu benutzen, einen besonderen von der Brücke unabhängigen Schlüssel in den Galvanometerkreis einzuschalten. Liegt andererseits der zweite Fall vor, so ist das Galvanometer direkt an die Enden des Schleifdrahtes anzulegen, so dass der Uebergangswiderstand im Kabelarm liegt. Wenn zur Verbindung von Kabelschleife und Brücke besondere Zuleitungsdrähte dienen, so ist es am zweckmässigsten, dieselben mit den Kabelenden zu verlöthen.

55. Methoden des Spannungsabfalles. Das Princip dieser Methoden ist ausserordentlich einfach. Sie erfordern ein Galvanometer, dessen Ablenkungen proportional der Stromstärke sind. Das Instrument wird dazu benutzt, relative Potentialdifferenzen zu messen. Sein Widerstand muss hoch sein im Vergleich zu den Widerständen der Batterie, des Fehlers, der Zuleitungsdrähte (Prüfdrähte) und des Kabels. Ist das nicht der Fall, so ist dem Instrument ein Widerstand vorzuschalten, damit dieser Bedingung genügt wird. Die Her-

stellung der Schaltung erfolgt nach Fig. 79. Zwischen Punkt A und Erde liegt die Batterie; eine Akkumulatorenbatterie erfüllt am besten den Zweck, da während der Dauer der Messung ein absolut konstanter Strom erforderlich ist. AB stellt einen bekannten Widerstand W dar, BD ist das fehlerhafte Kabel, C der Ort des Fehlers. x soll der Widerstand des Stückes BC sein. Verbindet man die Punkte 1, 3 mit einander, so erhält man einen Galvanometerausschlag d_1, proportional der Potentialdifferenz zwischen A und B.

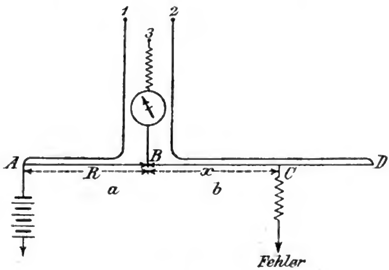


Fig. 79.

Verbindet man 2 und 3, so erhält man eine Ablenkung d_2, proportional der Potentialdifferenz zwischen B und C, da der Theil CD des Kabels sich überhaupt nicht in dem Stromkreis befindet. Dann verhält sich

$$\frac{R}{x} = \frac{d_1}{d_2}$$

und es ist

$$x = R\frac{d_2}{d_1}. \qquad (76)$$

Die praktische Anwendung des vorstehend erläuterten Princips führt zu den beiden folgenden Methoden.

AB sei ein Stück intakten Kabels in Serie geschaltet mit BD, dem fehlerhaften Stück. Prüfdrähte oder gut isolirte Leitungen dienen dazu, die Punkte D und B mit der Prüfstation im Punkte A zu verbinden. Mit dem Galvanometer wird ein Widerstandskasten hintereinander geschaltet. Dieser Widerstand wird so eingestellt, dass die beiden Ablenkungen d_1 und d_2 eine passende Grösse annehmen. Sei b die gesuchte Entfernung, d. h. die Länge des

Kabelstückes von B bis C, und a die Länge des gesunden Kabelstückes $A\,B$. Haben beide Stücke denselben Querschnitt, so ist:

$$b = a\,\frac{d_2}{d_1}. \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (76\,\text{a})$$

Wenn die Längen $A\,B$ und $B\,C$ aus Kabeln von verschiedenem Querschnitt gebildet sind, so ist statt a die äquivalente Länge a' des Stückes $A\,B$ einzuführen. Hat $A\,B$ in seiner ganzen Länge den Querschnitt s_1 und $B\,C$ den Querschnitt s_2, so ist

$$b = a'\,\frac{d_2}{d_1} = a\,\frac{s_2}{s_1}\,\frac{d_2}{d_1}, \qquad \ldots\ldots \quad (76\,\text{b})$$

wo a die wirkliche Länge des Stückes $A\,B$, $a' = a\,\frac{s_2}{s_1}$ seine äquivalente Länge ist, d. h. die Länge des Kabels vom Querschnitt s_2, das denselben Widerstand wie das Stück $A\,B$ haben würde.

Wenn in Folge besonderer Umstände ein unversehrtes Kabelstück $A\,B$ mit einem von B zur Prüfstation zurückführenden Prüfdraht nicht zur Verfügung steht, so kann man für $A\,B$ ein Stück eines in der Centrale selbst liegenden Kabels nehmen, während $B\,D$ wie vorher die fehlerhafte Kabelstrecke bedeutet. Dann ist nur noch ein Prüfdraht erforderlich, der das entfernte Ende des Kabels mit der Prüfstation verbindet. Man muss indessen bei dieser Anordnung berücksichtigen, dass unter Umständen eine beträchtliche Temperaturdifferenz zwischen beiden Kabelstücken bestehen kann. Bei der Berechnung der äquivalenten Länge des in der Station befindlichen Kabelstückes hat man dann pro Grad Celsius Temperaturüberschuss über das im Boden liegende Kabel 0,4 % aufzuschlagen. Länge und Querschnitt des Kabelstückes in der Station werden zweckmässig so gewählt, dass seine äquivalente Länge und demnach auch sein Widerstand etwa der gleiche ist wie der des fehlerhaften Kabels von der Station bis zum Fehler, damit die Ablenkungen d_1 und d_2 nicht zu verschieden ausfallen.

Es sei z. B. ein Fehler in einem zur Centrale führenden Kabel von 120 qmm Querschnitt, und man vermuthet, dass der Abstand des Fehlers von der Centrale etwa 100 m beträgt, dann hat man, wenn man für $A\,B$ ein Stück Kabel von 25 qmm Querschnitt wählt, eine Länge zu nehmen von $\frac{100\,.\,25}{120} = 20{,}8$ m. Wäre der Temperatureinfluss zu vernachlässigen, so betrüge die äquivalente Länge dieses

Stückes 100 m. Hat jedoch dieses Kabel etwa eine um 7 Grad höhere Temperatur als das im Erdboden liegende fehlerhafte, so kommen noch 3 % zu diesem Werthe hinzu, und die äquivalente Länge würde sich nunmehr zu 103 m berechnen. Hätte man beziehungsweise die Ablenkungen $d_1 = 241$ und $d_2 = 218$ erhalten, so würde der Abstand des Fehlers von der Centrale

$$a = \frac{218}{241} 103 = 93{,}2 \text{ m}$$

betragen.

Der Querschnitt des Kabels $A\,B$ und die durch den Kreis $A\,B\,C$ gesandte Stromstärke ist so zu bemessen, dass in keinem der Kabel eine beträchtliche Erwärmung auftreten kann. Dieser Umstand ist bei der Anwendung durchaus zu beachten. Die Verbindung zwischen den beiden Kabeln in B muss sehr gut sein, am sichersten stellt man sie mittels einer Kabelklemme her, die über die sauber geputzten Enden der Kabel gesteckt wird.

Die wesentlichste Schwierigkeit, die bei der praktischen Ausführung dieser Methoden des Spannungsabfalles auftritt, besteht darin, den durch den Kreis $A\,B\,C$ fliessenden Strom während der Dauer der Messung absolut konstant zu erhalten. In einem Stromkreis gewöhnlicher Art wäre diese Bedingung leicht zu erfüllen, in dem gegebenen Falle bildet jedoch einen Theil des Stromkreises der Fehler selbst, der einen ständig wechselnden Widerstand darbietet. Bei der Ausführung der Messungen wird zunächst der Widerstand des Galvanometerkreises so geregelt, dass die Ablenkungen d_1 und d_2 eine passende Grösse erhalten. Wenn nöthig, muss man die Einstellung der für den Versuch passenden Stromstärke an der Dynamo oder an der Batterie selbst vornehmen und ausserdem noch einen Widerstand zwischen Batterie und Punkt A schalten. Zur bequemen Ausführung der beiden erforderlichen Schaltungen 1, 3 und 2, 3 dient ein Umschalter irgend welcher Konstruktion, am einfachsten ein Stöpselumschalter. Mit der endgültigen Messung ist erst dann zu beginnen, wenn der Stromkreis etwa 5 Minuten lang geschlossen war, so dass der Widerstand des Fehlers voraussichtlich einen konstanten Werth angenommen hat. Der Strom muss nun absolut konstant gehalten und darf während der Dauer der Messung nicht unterbrochen werden. Zuerst wird die Verbindung 1, 3 hergestellt. Die entstehende Ablenkung wird beobachtet, bis sich keinerlei Schwankungen zeigen. Dann wird der Umschalter auf 2, 3 gestöpselt.

d_2 wird so rasch wie möglich abgelesen und dann 1, 3 wiederholt. Erhält man wieder denselben Werth wie zuvor, so können die Ablesungen d_1 und d_2 als endgültige angenommen werden. Ist jedoch d_1 bei der zweiten Ablesung beträchtlich verschieden, so muss man die Ablesungen so lange wiederholen, bis dieselben hinlänglich konstant geworden sind.

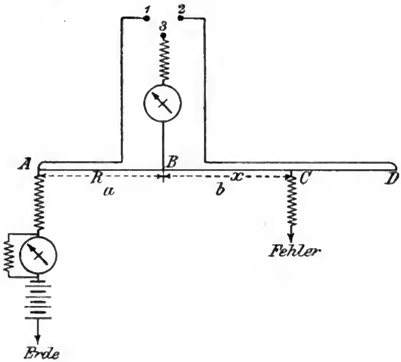


Fig. 80.

Im Folgenden ist ein Beispiel einer solchen Versuchsreihe mitgetheilt.

d_1	d_2
216	
	186
225	
	197
230	
	198
231	
	198

Die Werthe 230 und 198 wurden in diesem Falle der Berechnung des Fehlers zu Grunde gelegt. Wenn die Ablesungen und Schwankungen sehr unregelmässig sind, so muss man aus einer grösseren Zahl die Mittelwerthe nehmen und daraus $\frac{d_2}{d_1}$ berechnen. In dem angeführten Beispiel ergiebt sich aus den angenommenen Werthen $\frac{d_2}{d_1} = 0{,}861$. Die Summe aller Ablesungen d_2 ist 779, die aller

Ablesungen d_1 902, so dass sich mit Hilfe der Mittelwerthe $\frac{d_2}{d_1} = \frac{779}{902} = 0{,}864$ ergiebt, ein Resultat, das gegen das erst gewonnene eine Differenz von nur $\frac{1}{3}\%$ aufweist.

Rathsam ist es, ein Ampèremeter in den Batteriekreis einzuschalten, um Stärke und Konstanz des Stromes kontrolliren zu können. Zugleich mit dem Ampèremeter, als welches man wegen seiner aperiodischen Einstellung zweckmässig ein Galvanometer vom Deprez d'Arsonval-Typus mit passendem Nebenschluss verwendet, ist ein Regulirwiderstand in den Batteriekreis zu legen (Fig. 80). Dieser Regulirwiderstand dient dazu, die durch die Veränderung des Fehlerwiderstandes erfolgenden Stromschwankungen zu kompensiren.

Zur Ausführung der Messung sind zwei Beobachter erwünscht; der eine übernimmt die Beobachtung des Ampèremeters und das Konstanthalten des Stromes, der zweite führt die Fehlerbestimmung mittels des zweiten Galvanometers aus.

56. Die Schleifenmethoden sind in jedem Falle, wo ihre Anwendung möglich ist, den Methoden des Spannungsabfalls vorzuziehen, da sich ihre Ausführung wesentlich einfacher gestaltet. Dieselben sind Nullmethoden und werden durch Veränderungen im Widerstande des Fehlers nicht beeinflusst. Ein anderer grosser Vorzug der Schleifenmethoden ist der, dass unter allen Umständen dieselben Apparate und Messverfahren benutzt werden können, welches auch der Widerstand des Fehlers oder der Querschnitt des Kabels sei. Die Methoden des Spannungsabfalls müssen dagegen jedem Fall besonders angepasst werden.

Zuweilen ersetzt man bei den Schleifenmethoden das Galvanometer durch ein Telephon, wobei man die Stromimpulse durch einen Kontaktmacher im Batteriekreise herstellt. Diese Modifikation ist im Allgemeinen nicht empfehlenswerth. Erstens gebraucht man mehr Zeit zur Einstellung des Brückengleichgewichts, da man dem Tone des Telephons nicht anhören kann, ob man sich rechts oder links von der Gleichgewichtslage befindet, beziehungsweise ob mehr oder weniger Widerstand in den veränderlichen Zweig der Brücke einzuschalten ist. Zweitens kann die Anwendung von pulsirenden Strömen oder Wechselströmen in der Brücke zu Fehlern führen wegen der verschiedenen Kapacitäten und Selbstinduktionen der verschiedenen Theile der Schleife.

Die Methode von Varley ist beschränkt auf solche Fälle, wo der Widerstand der Schleife nicht zu klein ist. Der Grund dafür liegt darin, dass der Werth von d in Gleichung (74) anderenfalls so klein werden würde, dass man mit den Sätzen eines gewöhnlichen Widerstandskastens eine einigermaassen genaue Einstellung nicht erzielen könnte.

57. Fehlerbestimmungen ohne Rückleitung. Wenn keine Rückleitungen, weder ein zweites Kabel noch ein Prüfdraht zur Verfügung stehen, fällt es schwer, einen einigermaassen hohen Grad von Genauigkeit in der Fehlerbestimmung zu erreichen.

Hat man zwei Deprez d'Arsonval-Galvanometer, so ist die zweckmässigste Methode eine Spannungsabfallmethode folgender Art:

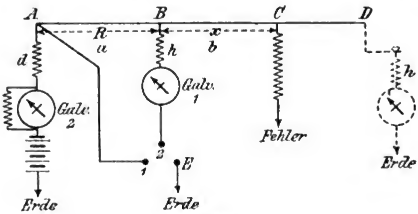


Fig. 81.

Die Verbindungen werden nach Fig. 81 hergestellt, das entferntere Ende D des Kabels bleibt zunächst frei. Ein Beobachter muss sich während der Messung am Orte des Galvanometers 2 befinden und mittels des Widerstandes d den Strom konstant halten. Mit dem Galvanometer 1 ist ein Widerstand h in Serie geschaltet, so dass der Widerstand dieses Galvanometerkreises gross ist im Vergleich zu dem das Kabel und den Fehler enthaltenden Stromkreis $ABCE$. AB ist ein Stück intakten Kabels. Es werden nun die Ablenkungen d_1, d_3 gemessen, die sich bei Herstellung der Verbindungen 2, 1 und 2, E ergeben.

Der Widerstand h ist so zu wählen, dass die grössere dieser beiden Ablenkungen bis nahe an das Ende der Skala reicht. Hierauf misst der Beobachter am Galvanometer 1 die Entfernung zwischen irgend einem an dem Galvanometer markirten Punkt und dem Mittelpunkt sowie dem Ende seiner Galvanometerskala, um dadurch die gegenseitige Stellung zwischen Galvanometer und Skala festzulegen. Gal-

vanometer und Widerstand h werden nun so rasch wie möglich nach dem Ende D des Kabels gebracht, während welcher Zeit der Beobachter 2 den Strom absolut konstant halten muss. In D werden zunächst mittels der vorher ermittelten Abmessungen Galvanometer und Skala wieder in denselben gegenseitigen Abstand gebracht wie vorher; dann wird die durch die punktirten Linien angedeutete Verbindung hergestellt, h ebenso eingestellt wie vorher und die Ablesung d_4 vorgenommen. Der Ort des Fehlers ist gegeben durch die Gleichung:

$$x = \frac{d_3 - d_4}{d_1} a. \qquad (77)$$

a ist die äquivalente Länge des Stückes AB, x der Abstand des Fehlers von B.

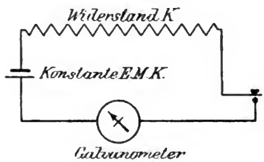


Fig. 82.

Wird die Stromstärke absolut konstant gehalten, so ergiebt die Messung ziemlich genaue Resultate.

Verfügt man nicht über zwei d'Arsonval-Galvanometer, so kann man No. 2 auch durch ein für schwache Ströme empfindliches Ampèremeter irgend welcher Konstruktion ersetzen. Auf die Kenntniss des absoluten Werthes der Stromstärke kommt wenig an, die Hauptsache ist, dass dieselbe während der ganzen Dauer des Versuchs unverändert bleibt.

Die Verwendung des d'Arsonval-Galvanometers ist aus dem Grunde rathsam, weil dieses Instrument wegen seiner Unabhängigkeit von der Horizontalkomponente des Erdmagnetismus und von benachbarten magnetischen Feldern auch an verschiedenen Orten mit verschiedenen magnetischen Verhältnissen seine Konstante beibehält. Bedient man sich eines anderen, etwa eines astatischen Instruments, so muss sich der Messung an den beiden Stationen jedesmal die Bestimmung der Konstanten des Galvanometers anschliessen. Man führt dieselbe am einfachsten in der Weise aus,

dass man einen Strom von bekannter Intensität durch das Galvanometer schickt, indem man dieses hintereinander mit einem Element von bekannter E.M.K. und einem grossen Widerstande K (Fig. 82) in einen Stromkreis schaltet. Erhält man auf der einen Station den Ausschlag k_1, auf der anderen den Ausschlag k_2, so ist Formel (77) abzuändern in

$$x = \frac{\frac{d_3}{k_1} - \frac{d_4}{k_2}}{\frac{d_1}{k_1}} a \quad \text{. . . . . (78)}$$

oder

$$x = \frac{d_3 k_2 - d_4 k_1}{d_1 k_2} a. \quad \text{. . . . . . (78a)}$$

Bei der Bestimmung der Empfindlichkeit ist das Galvanometer eventuell mit einem passenden Nebenschluss zu versehen, dessen Grösse jedoch aus der Endformel herausfällt.

Wir wollen nunmehr die Fälle betrachten, in denen der Fehler einen so vollkommenen Erdschluss darstellt, dass sein Widerstand klein ist im Vergleich zu dem des Kabels selbst und dass er ausserdem einen merklich konstanten Werth hat. Ist eine passende Schleife oder Rückleitung nicht vorhanden, so kann man sich dann einer der folgenden Methoden bedienen.

58. Man stellt die einfache Brückenschaltung nach Fig. 83 her, wobei man den Galvanometerschlüssel vor dem Batterieschlüssel schliesst, also auf den falschen Nullpunkt einstellt. Es wird der Widerstand zwischen jedem Ende des Kabels und Erde gemessen, wobei das entfernte Ende jedesmal isolirt bleibt. Ergeben sich von den beiden Enden aus bezüglich die Werthe r_1, r_2, ist l die Länge des Kabels, s sein Widerstand pro m (der aus früheren Messungen bekannt sein muss) und e der Uebergangswiderstand zur Erde in der Prüfstation, so ist der Abstand des Fehlers vom Ende 1 in m

$$a = \frac{r_1 - r_2 + l s}{2 s}. \quad \text{. . . . . . . (79)}$$

Sei x der Widerstand des Kabels vom Ende 1 bis zum Fehler, dessen Eigenwiderstand f sein möge, so ist $l s - x$ der Widerstand des Kabels vom Ende 2 zum Fehler. Die erste Messung ergiebt

$$r_1 = x + f + e.$$

Die zweite Messung

$$r_2 = (l\,s - x) + f + e.$$

Durch Subtraktion beider Gleichungen folgt:

$$r_1 - r_2 = 2\,x - l\,s$$

und

$$x = \frac{r_1 - r_2 + l\,s}{2}.$$

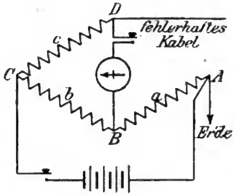


Fig. 83.

Da nun der Widerstand pro m Kabel s Ohm beträgt, so ist der Abstand des Fehlers vom Ende 1

$$a = \frac{x}{s} = \frac{r_1 - r_2 + l\,s}{2\,s}.$$

Voraussetzung dieser Methode ist, dass Fehlerwiderstand und Erdübergangswiderstand während der Dauer der Messung unverändert bleiben.

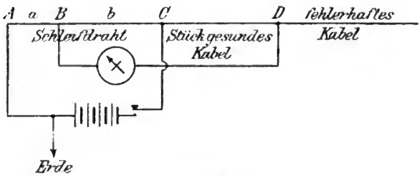


Fig. 84.

Bedient man sich einer Brücke mit ausgespanntem Messdraht, so sind die Verbindungen nach Fig. 84 herzustellen. CD ist eine Leitung, deren äquivalente Länge, bezogen auf den Querschnitt des fehlerhaften Kabels, c sei. Zu den Messungen von beiden Enden

aus muss man dasselbe Stück verwenden. Sind beim Gleichgewicht der Brücke die durch den Schleifkontakt B gebildeten Abschnitte des Messdrahtes bei der ersten Messung a_1, b_1, bei der Messung vom anderen Ende aus a_2, b_2 und setzt man

$$\frac{a_1}{b_1} = d_1, \qquad \frac{a_2}{b_2} = d_2$$

so ist zu setzen

statt r_1 | $d_1\, c\, s$, statt r_2 | $d_2\, c\, s$

und Formel (79) geht über in

$$a = \frac{1}{2}\left\{c\,(d_1 - d_2) + l\right\}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (80)$$

59. Blavier's Methode. Bei dieser Methode werden die Messungen nur an einem Ende des Kabels ausgeführt. Es wird der Widerstand zwischen Kabel und Erde bestimmt, einmal wenn das entfernte Ende frei, das zweite Mal, wenn es geerdet ist. Sind diese Widerstände bezüglich r_1, r_2, bedeuten l und s Länge des Kabels in m und Widerstand derselben pro m, so ist der Abstand des Fehlers in m vom Orte der Messung durch den Ausdruck gegeben:

$$a = \frac{r_2 - \sqrt{(r_1 - r_2)\,(l\,s - r_2)}}{s}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (81)$$

Ist s aus früheren Messungen nicht bekannt, so erhält man diesen Werth durch Messung des Widerstandes eines gesunden Kabelstücks von gleichem Querschnitt; ist auch ein solches nicht zu erlangen, so muss der Widerstand aus dem Querschnitt und der Leitungsfähigkeit des Kupfers berechnet werden.

Die Ableitung von Formel (81) ergiebt sich auf folgendem Wege. Es ist:

$$r_1 = x + f + e,$$

wo wiederum x, f und e Widerstand des Kabels vom Stationsende bis zum Fehler, Fehlerwiderstand und Erdübergangswiderstand bedeuten. Daraus folgt:

$$f + e = r_1 - x.$$

Bei der zweiten Messung — entferntes Kabelende geerdet — ist dem Fehlerwiderstande der Widerstand des Kabelstücks vom Fehler bis zum Ende parallel geschaltet. r_2 hat demnach den Werth:

$$r_2 = \frac{(f+e)(ls-x)}{f+e+ls-x} + x.$$

Nun setze man für $f+e$ seinen Werth ein. Dann wird:

$$r_2 = x + \frac{(r_1 - x)(ls - x)}{r_1 - x + ls - x}.$$

Löst man diese Gleichung nach x auf, so entsteht die quadratische Gleichung:

$$x^2 - 2 r_2 x = (r_1 - r_2) ls - r_1 r_2.$$

Da x kleiner sein muss als r_2, so ergiebt sich die eindeutige Lösung:

$$x = r_2 - \sqrt{(r_1 - r_2)(ls - r_2)}.$$

Und der Abstand des Fehlers von dem Ende, von dem aus die Messung stattfand, ist:

$$a = \frac{x}{s} = \frac{r_2 - \sqrt{(r_1 - r_2)(ls - r_2)}}{s}. \quad . \quad . \quad . \quad (81)$$

Auch Blavier's Methode lässt sich mittels eines Schleifdrahtes ausführen. Das Schema der Schaltung ist dasselbe wie in Fig. 84, die Länge CD bedeutet ein gesundes Kabelstück, das als dritter Arm der Brücke dient. Die äquivalente Länge dieses Stückes sei c. Sind bei den beiden erforderlichen Einstellungen der Brücke die Gleichgewichtslagen gegeben durch die Abgrenzung der Längen a_1 b_1 und a_2 b_2 auf dem Schleifdraht, so ist, wenn wieder

$$\frac{a_1}{b_1} = d_1, \qquad \frac{a_2}{b_2} = d_2$$

gesetzt wird, der Abstand des Fehlers vom Ende, an dem die Messung stattfindet, gegeben durch den Ausdruck:

$$a = c\left\{ d_2 - \sqrt{(d_1 - d_2)\left(\frac{l}{c} - d_2\right)}\right\}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (82)$$

Der Ausdruck der linken Seite ergiebt sich wieder aus dem entsprechenden der Formel (81), wenn man dort

$$r_1 = d_1 c s, \qquad r_2 = d_2 c s$$

einsetzt.

Es war schon hervorgehoben worden, dass die Schleifenmethoden bei Fehlerbestimmungen in der Regel die genauesten Resultate liefern und dass es nur in solchen Fällen rathsam ist, auf die Benutzung dieser Methoden zu verzichten, wenn die Herstellung einer Schleife schlechterdings nicht möglich erscheint. Unter diesen Umständen sieht man sich vielfach genöthigt, ohne gerade während des Betriebes die Messungen ausführen zu müssen, doch die Verbindungen im Netze möglichst wenig zu verändern, die Schleife also mit der gegebenen Disposition des Kabelnetzes herzustellen. Es sei indessen bemerkt, dass man Messungen auf solcher Grundlage nur in den dringendsten Fällen vornehmen sollte, da man stets die grösste Genauigkeit an einer freien, vom Netze gänzlich losgelösten Kabelschleife erzielt.

Ein Bogenlampen-Serienstromkreis bietet einen der einfachsten Fälle dar. Man nimmt an jeder Lampe die Kabel aus den Klemmen heraus und verbindet dieselben direkt mit einander. So bekommt man eine den ganzen Stromkreis umfassende gute Schleife und kann eine sehr genaue Fehlerbestimmung vornehmen.

60. Mit Rücksicht auf den eben aufgestellten Gesichtspunkt, möglichst mit den gegebenen Verbindungen und Leitungen des Netzes zu arbeiten, soll noch die Fehlerbestimmung in einem Netz mit vielen Speiseleitungen eingehender erörtert werden. Die mitgetheilten Schaltungen sind von Frölich angegeben worden[1]). Man sucht sich zunächst über die ungefähre Lage des Fehlers in folgender Weise zu orientiren.

Die zu dem fehlerhaften Strang führenden Speiseleitungen und ihre Prüfdrähte werden vom Schaltbrettt abgenommen und zwei benachbarte Speiseleitungen nach Fig. 85 verbunden. *a*, *b* sei ein Schleifdraht oder ein Widerstandskasten. P_3, P_4 sind die Prüfdrähte, H_3, H_4 die Speiseleitungen, g das Galvanometer. Die Schaltung ist also die der Murray'schen Schleifenmethode. Das Stück 3, 4 der Vertheilungsleitung bildet die Schleife, H_3, H_4 sind die Zuleitungsdrähte zur Brücke, deren Widerstand zumeist gegen den der Brückenwiderstände vernachlässigt werden kann; die Prüfdrähte P_3, P_4 dienen als Galvanometerleitungen. Ist bei Einschaltung der Brücke zwischen 3, 4 eine Einstellung auf Gleichgewicht nicht zu erzielen, so geht man je nach dem aus der äussersten Lage des Schleifkontaktes oder dem

[1]) Vergl. Frölich, E. T. Z. 1893.

Verhältniss der Brückenwiderstände erkennbaren Sinne der Abweichung zu der vorhergehenden oder nachfolgenden durch zwei Speiseleitungen eingegrenzten Strecke der Vertheilungsleitung über.

Nähert sich z. B. das Galvanometer der Gleichgewichtslage, wenn man den Schleifkontakt gegen das rechte Ende des Messdrahtes hin verschiebt, so schreitet man zu den in dieser Richtung liegenden beiden nächsten Speisekabeln fort, legt also in Fig. 85 die Brücke zwischen 4, 5. Erhält man dort eine Einstellung der Brücke und sind die Abschnitte auf dem Messdraht a, b, so ist die

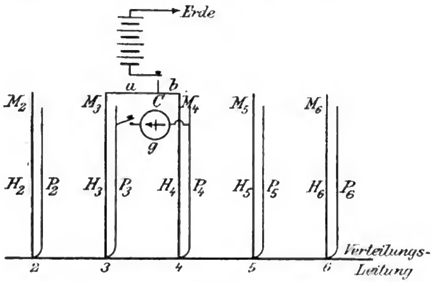


Fig. 85.

Entfernung des Fehlers in der Vertheilungsleitung vom linksgelegenen Speisepunkte 4 aus gerechnet:

$$\frac{a}{a+b}\,l,$$

wenn l die Länge der Vertheilungsleitung zwischen den Punkten 4, 5 ist.

Wenn bei Anlegen der Brücke zwischen H_3 und H_4 der Schleifkontakt ganz am rechten Ende, bei der Messung zwischen H_4 und H_5 ganz am linken Ende des Messdrahtes seine Gleichgewichtsstellung erreicht, so ist der Fehler in der in dem Punkte 4 mündenden Speiseleitung selbst zu suchen. Um in diesem Falle den Ort des Fehlers zu bestimmen, legt man das Galvanometer nicht vermittels der Prüfdrähte an die Speisepunkte 4, 5 selbst, bezieht vielmehr die Speiseleitungen H_4, H_5 mit in die Schleife ein und schaltet das Instrument zwischen die Punkte M_4, M_5 ein. Die Schleife besteht dann also

aus dem Kreise M_4, 4, 5, M_5. Ist ihre äquivalente Länge l, so ist der Abstand des Fehlers vom Punkte M_4 wiederum:

$$\frac{a}{a+b}\,l.$$

Sei z. B. $H_4 = 366$ m, $H_5 = 457$ m, und die Länge des zwischen beiden Speisepunkten liegenden Stückes der Vertheilungsleitung 91,5 m. Sind die Querschnitte der Speiseleiter 35 qmm, der der Vertheilungsleitung 70 qmm, so ist die äquivalente Länge der Schleife $l = 869$ m. Ergiebt sich für $\frac{a}{a+b}$ der Werth 0,34, so würde also der Abstand des Fehlers vom Punkt M_4 $0{,}34 \,.\, 869 = 295$ m betragen.

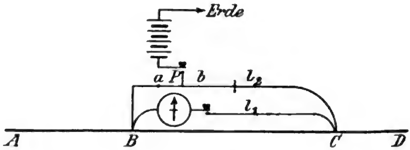


Fig. 86.

Geht aus der zweiten Messung darnach mit Sicherheit hervor, dass der Fehler in der Speiseleitung liegt, so trennt man den betreffenden Feeder zugleich mit dem ihm entsprechenden, der den anderen Pol der Vertheilungsleitung speist, an der Verbindungsmuffe vom Netze los und verbindet sie beide mit einander. Hierauf wird die Schleifenmessung in der üblichen Weise ausgeführt.

Im Falle der Fehler in der Vertheilungsleitung liegt, so ist seine ungefähre Lage in derselben bereits durch die oben beschriebene Messung bestimmt.

Um seinen Ort genau festzulegen, unterwirft man nunmehr den zwischen zwei Muffen liegenden Abschnitt des Kabels, in dem sich der Fehler nach der ersten Messung befinden soll, noch einer besonderen Prüfung.

Die Schaltung ist nach Fig. 86 auszuführen und bedarf keiner näheren Erläuterung mehr. Als Verbindungsdrähte zu Galvanometer und Schleifdraht resp. Widerstandskasten sind besondere Hilfsleitungen von möglichst starkem Querschnitt zu wählen, deren Widerstand gegebenenfalls nach Gl. (73a) berücksichtigt werden kann.

61. Methode von Collis. Eine weitere Methode für Fehlerbestimmungen auf der Strecke ist die folgende (Fig. 87). Man bildet eine Schleife, die das fehlerhafte Kabelstück $A\,B$ enthält. Mittels einer an einem Ende angeschlossenen Batterie wird ein Strom durch die Schleife gesandt. Ein Stück blanken Kupferkabels $C\,D$ verlegt man auf Isolatoren von A nach B, parallel mit dem fehlerhaften Kabel. A und C sowie B und D werden mit einander verbunden. Dabei ist es wichtig, den Uebergangswiderstand zwischen A und C und B und D möglichst klein zu machen. Das Galvanometer ist einpolig an Erde gelegt, während an das andere Ende eine bewegliche Leitung angeschlossen wird, deren zu einem Haken umgebogenes blankes Ende auf dem Draht $C\,D$ schleift. Dieser Schleifkontakt wird so lange

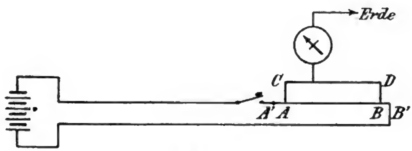


Fig. 87.

verschoben, bis das Galvanometer in seine Ruhelage zurückkommt, wobei indessen stets die Verbindung zwischen Galvanometer und Schleifdraht bei Schluss der Batterie schon hergestellt sein muss, da man auf den falschen Nullpunkt einzustellen hat. Der Schleifdraht sowohl wie die schleifende Galvanometerleitung müssen gut isolirt sein. Der Punkt des Kabels $A\,B$, welcher der Gleichgewichtslage auf dem Drahte $C\,D$ entspricht, giebt den Ort des Fehlers an.

Die Einstellung auf den falschen Nullpunkt ist als erheblicher Nachtheil der Methode anzusehen; auch durchfliesst in der Regel schon ein ziemlich starker Strom das Galvanometer, bevor der Batterieschlüssel überhaupt eingeschaltet ist.

Allgemein ist für die Methoden, bei denen die Fehlerbestimmung ohne Lostrennung des fehlerhaften Theils vom übrigen Netz ausgeführt wird, zu bemerken, dass sie nur dann brauchbare Ergebnisse liefern können, wenn der Widerstand des Fehlers erheblich kleiner ist als der Isolationswiderstand des gesammten übrigen noch angeschlossenen Netzes.

62. Kurzschlüsse zwischen zwei Leitern. Wenn zwischen zwei Leitern eines Mehrfachkabels ein Kurzschluss entstanden ist, so kann man irgend eine der bereits beschriebenen Methoden ohne Weiteres zur Bestimmung des Fehlers anwenden, falls man das eine Kabel als „Erde“ ansieht. Will man eine Schleife bilden, so ist allerdings noch eine dritte gesunde Leitung erforderlich. Bei Drehstromkabeln steht eine solche fast stets zur Verfügung, so dass bei diesen der Anwendung der Schleifenmethode nichts im Wege steht.

Anders bei Zweifach-Kabeln. Hier muss man, um die Schleifenmethode zu benutzen, eine besondere Rückleitung anlegen; falls das nicht möglich ist, ist man auf die im vorigen Abschnitt beschriebenen Methoden angewiesen, die auf der Kombination mehrerer unter verschiedenen Bedingungen vorgenommener Widerstandsmessungen beruhen; indessen sind die Endformeln für den vorliegenden Fall etwas zu modificiren.

Brückenmethode. Der Widerstand zwischen den beiden Kabeln wird von jedem Ende aus mit der Wheatstone'schen Brücke gemessen, wobei jedesmal das entfernte Ende frei bleibt. Es seien

r_1, r_2 die Werthe der so erhaltenen Widerstände,
l die Länge der untersuchten Kabelstrecke (gegenseitige Entfernung der beiden Punkte, von denen aus die Messungen vorgenommen wurden),
s_1, s_2 die Widerstände der beiden Kabelleiter pro m,
f der Fehlerwiderstand,
m die Entfernung des Fehlers vom Ende 1.

Dann ergiebt sich:

$$r_1 = m\,s_1 + f + m\,s_2 = m\,(s_1 + s_2) + f$$
$$r_2 = (l - m)\,(s_1 + s_2) + f.$$

Durch Subtraktion folgt:

$$r_1 - r_2 = (s_1 + s_2)\,(2\,m - l)$$

und weiter

$$m = \frac{r_1 - r_2 + l\,(s_1 + s_2)}{2\,(s_1 + s_2)}. \quad \ldots\ldots \quad (83)$$

Haben beide Leiter, wie es zumeist der Fall ist, gleichen Querschnitt, so vereinfacht sich die Formel zu:

$$m = \frac{r_1 - r_2 + 2\,l\,s}{4\,s}. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (83\,a)$$

Wird ein Schleifdraht zur Messung benutzt und zum Vergleich ein Stück gesundes Kabel von gleichem Querschnitt s und der Länge c verwendet, und bezeichnet man die Abschnitte des Schleifdrahtes bei Brückengleichgewicht mit $a_1\, b_1$, $a_2\, b_2$, so ist für $r_1\, r_2$ zu setzen:

$$r_1 = \frac{a_1}{b_1}\, c\, s$$

$$r_2 = \frac{a_2}{b_2}\, c\, s$$

und (83a) geht über in:

$$m = \frac{c\left(\frac{a_1}{b_1} - \frac{a_2}{b_2}\right) + 2\,l}{4} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (84)$$

Blavier's Methode. Ganz entsprechend dem früher über die Methode Gesagten wird der Widerstand zwischen den Kabeln gemessen, einmal wenn die entfernten Enden frei und ein zweites Mal wenn sie mit einander verbunden sind. Die Widerstände in beiden Fällen seien r_1, r_2, der Abstand des Fehlers von dem Ende aus, von dem die Messung erfolgt, m, die übrigen Grössen haben dieselben Bezeichnungen wie bei der vorigen Methode. Dann ist:

$$r_1 = m\, s_1 + f + m\, s_2.$$

Setzt man zur Abkürzung $s_1 + s_2 = k$, so wird:

$$f = r_1 - m\, k.$$

Weiter ist:

$$r_2 = m\,k + \frac{f\,k\,(l - m)}{f + k\,(l - m)}.$$

Setzt man für f seinen Werth ein, und löst die Gleichung nach m auf, so erhält man:

$$m = \frac{r_2 - \sqrt{(r_1 - r_2)\,(l\,k - r_2)}}{k}\ ; \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (85)$$

für $s_1 = s_2$, also $k = 2\,s$, wird:

$$m = \frac{r_2 - \sqrt{(r_1 - r_2)\,(2\,l\,s - r_2)}}{2\,s} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (85a)$$

Benutzt man wieder Schleifdraht und Vergleichskabel und setzt:

$$d_1 = \frac{a_1}{b_1}\,, \qquad d_2 = \frac{a_2}{b_2}\,,$$

so erhält man:

$$m = \frac{c}{2}\left\{d_2 - \sqrt{(d_1 - d_2)\left(\frac{2\,l}{c} - d_2\right)}\right\}. \quad . \quad . \quad . \quad (86)$$

Die beiden zuletzt behandelten Methoden sind anwendbar, wenn der zu lokalisirende Kurzschluss zugleich auch ein Erdschluss ist. Hat man es mit einem einfachen Kurzschluss zwischen zwei Leitern zu thun und ist die Isolation der Kabel im Uebrigen gut geblieben, so kann man folgende Methode benutzen.

63. Der eine der Leiter wird nach Fig. 88 als vierter Zweig einer Wheatstone-Brücke angeschlossen und an dem anderen Ende an Erde gelegt, der andere Leiter bleibt frei. Im Gleichgewicht

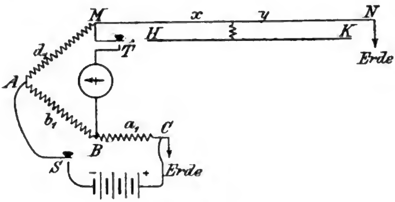


Fig. 88.

seien die Werthe der Brückenwiderstände $a_1\, b_1;\ d_1$. Hierauf wird der eine Pol der Batterie vom Punkte C abgenommen und mit dem Anfangspunkte H des bei der ersten Messung freigebliebenen Kabels HK verbunden (Fig 89), der Arm BC der Brücke wird durch Einstecken aller Stöpsel todtgemacht, so dass $a_2 = 0$ ist. Die Brücke befinde sich nunmehr im Gleichgewicht für die Werthe b_2, d_2. Bezeichnet man mit e den Widerstand der Erdverbindungen, mit x, y die Widerstände der Kabelstücke diesseits und jenseits des Fehlers in MN, so ergiebt sich aus der ersten Messung:

$$\frac{x + y + e}{a_1} = \frac{d_1}{b_1},$$

aus der zweiten Messung folgt:

$$\frac{x}{y + e} = \frac{d_2}{b_2}$$

oder

$$y + e = \frac{x\, b_2}{d_2}.$$

Setzt man diesen Werth in die der ersten Messung entsprechende Gleichung ein, so wird:

$$x \frac{\left(1 + \frac{b_2}{d_2}\right)}{a_1} = \frac{d_1}{b_1}$$

und:

$$x = \frac{d_1\, d_2}{b_1\,(b_2 + d_2)}\, a_1$$

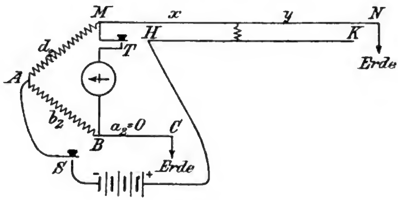


Fig. 89.

Ist s der Widerstand des Kabels MN pro m, so ist die Entfernung des Fehlers von M:

$$m = \frac{x}{s} = \frac{d_1\, d_2}{b_1\,(b_2 + d_2)} \frac{a_1}{s} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (87)$$

Benutzt man einen Schleifdraht, so ersetzt man den Widerstand a_1 wiederum durch ein gesundes Kabelstück und legt beim zweiten Theil der Messung die Erdleitung direkt an den Punkt B an. An Stelle des Werthes $\frac{a_1}{s}$ in Gleichung (87) ist dann dort die äquivalente Länge l_1 dieses Kabelstücks einzusetzen, sodass die Gleichung die Form annimmt:

$$m = \frac{d_1\, d_2}{b_1\,(b_2 + d_2)}\, l_1. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (88)$$

Als Erde kann man gegebenenfalls Bleimantel oder Armirung der Kabel benutzen; die an den Punkt B anzulegende Erdleitung muss möglichst kurz sein und darf während der Messung selbst nicht geändert werden, da bei der Ableitung der Gleichung ange-

nommen ist, dass der Erdübergangswiderstand während der ganzen Dauer der Messung unverändert bleibt.

Ein grosser Vorzug der Methode besteht darin, dass sie nur von dem Widerstand der beiden unverändert bleibenden Erdleitungen abhängt, dass dagegen der Widerstand des Kurzschlusses selbst gar nicht in Betracht kommt. Die Einstellung in der Brücke geschieht am besten auf den „falschen" Nullpunkt.

64. Hat der Fehler einen hohen Widerstand, der bis zu 1000 Ohm betragen darf, so kann man sich der Methode von Kilgour bedienen, die, auf dem Princip der Blavier'schen Methode beruhend, die Erdung des Stromkreises vermeidet. Die beiden Leiter eines zweifach koncentrischen Kabels der Länge L (Fig. 90) mögen einen Fehler vom Widerstande f haben. Dann wird das Kabel nach

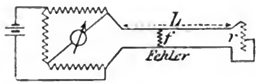


Fig. 90.

der aus der Figur ersichtlichen Weise in die Brücke eingeschaltet, während die Enden der beiden Leiter durch einen regulirbaren Widerstand r mit einander verbunden werden. Zunächst schaltet man den Widerstand aus. Man misst dann den Widerstand des Kabels bis zum Fehler plus dem Widerstande des Fehlers. Der Werth dieser Grösse sei A. Hierauf schaltet man einen passenden Widerstand r ein. Der Widerstand B, den man jetzt durch die Messung erhält, ist der Widerstand des Kabels bis zum Fehler plus der Parallelschaltung des Fehlerwiderstandes mit dem Widerstande des verbleibenden Kabelstücks inkl. des Widerstandes r. Nennt man den als bekannt vorausgesetzten Widerstand des intakten Kabels (beider zu einer Schleife verbundener Leiter) C, den Widerstand des Kabels bis zum Fehler x, so folgen aus den beiden Messungen die Gleichungen

$$A = f + 2x$$

$$B = 2x + \frac{f(C - 2x + r)}{f + C - 2x + r}.$$

Setzt man den Werth für f aus der ersten in die zweite Gleichung ein, so ergiebt sich für x die quadratische Gleichung:

$$x^2 - Bx + \frac{1}{4}\left\{(B-A)(C+r) - AB\right\} = 0.$$

Daraus berechnet sich:

$$2x = B - \sqrt{(B-A)(C+r-B)}.$$

Nennt man m den Abstand des Fehlers vom Anfangspunkte des Kabels, L die Länge des Kabels, so ist:

$$\frac{2x}{C} = \frac{m}{L}$$

oder

$$m = 2x\frac{L}{C}.$$

Hieraus ergiebt sich für den Ort des Fehlers die Bestimmungsgleichung:

$$m = \frac{B - \sqrt{(B-A)(C+r-B)}}{C}L \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (89)$$

65. Gerissene Leiter. Der Fall, dass ein Leiter reisst, kann natürlich nur bei Kabeln von schwachem Querschnitt oder bei den

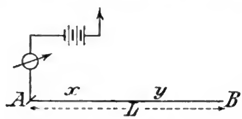


Fig. 91.

den Kabeln zur Spannungsmessung an den Speisepunkten beigegebenen Prüfdrähten eintreten. In diesen Fällen ist der Ort des Fehlers nur durch Messung der Kapacität der beiden Bruchstücke zu bestimmen. Voraussetzung ist dabei, dass der beschädigte Leiter noch so gut isolirt ist, dass man Ladungsmessungen an ihm ausführen kann. Ist das der Fall, so verfährt man folgendermaassen (Fig. 91): Die Gesammtlänge des Drahtes sei L, die der beiden Bruchstücke betrage beziehungsweise x und y. Man lege dann den zweiten Pol einer einpolig geerdeten Batterie zuerst an das eine Ende A, dann an das andere Ende B des Drahtes und bestimme in beiden Fällen nach der ballistischen Methode die Ladungsausschläge. Bezeichnet man dieselben mit a_1 und a_2, so bestehen die Gleichungen:

$$\frac{x}{y} = \frac{a_1}{a_2}$$

$$x + y = L.$$

Daraus ergiebt sich:

$$x = \frac{a_1}{a_1 + a_2} L \quad \ldots \ldots \quad (90\text{a})$$

$$y = \frac{a_2}{a_1 + a_2} L, \quad \ldots \ldots \quad (90\text{b})$$

womit der Ort des Fehlers festgelegt ist.

Der Ladungsausschlag für die Zuleitungen ist natürlich in jedem Falle von a_1 und a_2 abzuziehen. Statt der Ladungsausschläge kann man auch die Entladungsausschläge messen, wobei man sich eines Entladungsschlüssels zu bedienen hat.

66. Ausbrennen des Fehlers. In Wechselstrom-Hochspannungsnetzen befinden sich oft Fehler von 1 Megohm oder mehreren 1000 Ohm Widerstand, die an und für sich den Betrieb nicht stören, aber doch gelegentlich früher oder später zu einem Kurzschluss führen und die Hauptsicherungen durchbrennen können. Sobald man daher das Vorhandensein eines solchen latenten Fehlers bemerkt, darf man nicht zögern, denselben aufzusuchen und auszubessern, bevor er zu grösseren Störungen Veranlassung giebt. Solange jedoch der Fehler einen so hohen Widerstand hat, kann man nach den üblichen Methoden seinen Ort nicht bestimmen, da man nicht genug Strom durch ihn hindurchzutreiben vermag. Andererseits darf man auch nicht warten, bis er gröber wird, weil der Durchschlag sonst grade zu unrechter Zeit erfolgen kann. In solchen Fällen verfährt man am zweckmässigsten so, dass man zu einer Zeit, wo der fehlerhafte Theil des Kabels ohne grössere Betriebsstörungen isolirt werden kann, den Fehler absichtlich ausbrennt und ihn dann nach einer der angegebenen Methoden lokalisirt.

In einem Netz koncentrischer Kabel, die unter dem Bleimantel mit Papier oder imprägnirter Jute isolirt sind, ist es doppelt wichtig, den Fehler ohne Zeitverlust auszubrennen. Eine Beschädigung des Bleimantels ruft einen Fehler zwischen dem äusseren Leiter und Blei hervor, indem Feuchtigkeit in die Isolationsschicht eindringt. Wenn dieser Fehler zur rechten Zeit entdeckt wird, so dringt die Feuchtigkeit nicht bis zu der die beiden Leiter trennenden Isolationsschicht vor, und man kann den intakt gebliebenen Innenleiter als Rückleitung bei der Schleifenmethode verwenden. Wartet man in-

dessen zu lange, so liegt die Möglichkeit vor, dass auch zwischen den beiden Leitern ein Kurzschluss ausbricht; man beraubt sich dann der Möglichkeit, den Ort des Fehlers mittels der Schleifenmethode zu bestimmen und ist auf die weit unsichreren Methoden der Fehlerbestimmung ohne Rückleitung angewiesen.

Zum Durchbrennen eines Fehlers schlägt man den folgenden Weg ein (Fig. 92). Die Primärwickelung eines Transformators *A* ist über die Hochspannungssicherungen *a*, *a* an die Klemmen der Wechselstrommaschine angeschlossen. Die Niederspannungswicklungen zweier anderer Transformatoren *B* und *C* sind zu einander

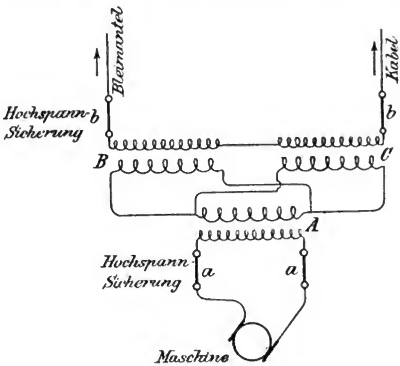


Fig. 92.

parallel und an die Sekundärwickelung des Transformators *A* angelegt. Die Hochspannungsspulen der Transformatoren *B* und *C* sind mit einander in Serie zwischen Leiter und Bleimantel des durchzuschlagenden Kabels geschaltet. Auf diese Weise kann man zwischen dem Leiter und dem Bleimantel des Kabels die doppelte Spannung herstellen wie an der Wechselstrommaschine. Die Grösse der Transformatoren ist ziemlich unwesentlich; die Sicherungen sind so zu bemessen, dass die Transformatoren nicht überlastet werden können. Da durch die Primärwickelung von *A* doppelt so viel Strom fliesst wie durch die Hochspannungswickelungen der Transformatoren *B* und *C*, so sind die Sicherungen *b*, *b* auf die halbe Abschmelzstromstärke der Sicherungen *a*, *a* zu dimensioniren.

Sind alle Verbindungen hergestellt, so erregt man die Wechselstrommaschine und geht mit der Spannung so lange herauf, bis die Sicherungen *b*, *b* durchbrennen. Sobald der Durchschlag erfolgt ist, schaltet man das Kabel ab und überzeugt sich durch Abprüfen mit einem Galvanoskop davon, ob ein völliger Erdschluss vorhanden ist. Zuweilen muss man das Verfahren mehreremale wiederholen, damit der Fehler gänzlich ausbrennt, da die Sicherungen oft schon abschmelzen,

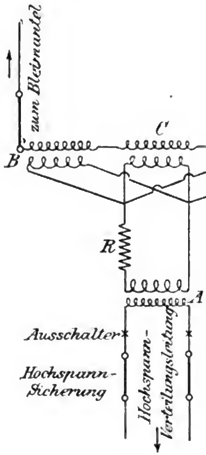


Fig. 93.

bevor der sich an der Fehlerstelle bildende Lichtbogen Zeit gefunden hat, die Isolation dort gänzlich auszubrennen. Um einen Anhalt über die Grösse der Durchschlagspannung zu haben, kann man noch an die primären oder sekundären Klemmen des Transformators *A* ein Voltmeter anlegen. Sollte die doppelte Maximalspannung der Wechselstrommaschine noch nicht ausreichend sein, das Kabel durchzuschlagen, so kann man noch einen dritten Transformator zu Hilfe nehmen, indem man seine Primärwickelung parallel zu der von *B* und *C*, seine Hochspannungswickelung in Serie mit denen dieser Transformatoren schaltet.

In jedem Falle muss man, bevor man eine so hohe Ueberspannung an das Kabel anlegt, ganz sicher sein, dass der Fehler wirklich im Kabel selbst liegt und nicht etwa durch Feuchtigkeit an den Enden bedingt ist. Die Transformatoren stellt man zweckmässig isolirt auf, bei der Verwendung dreier Transformatoren ist das für den an den Leiter des Kabels angeschlossenen unbedingt geboten.

Steht eine geeignete Wechselstrommaschine nicht zur Verfügung, so kann man auch von dem Hochspannungsnetz selbst ausgehen (Fig. 93). Man schaltet dann zwischen die Sekundärwickelung von A und die Transformatoren $B\,C\,D$ einen Regulirwiderstand R ein, so dass man mit der Spannung langsam heraufgehen kann.

67. Oft hört man die Frage: Wie gross muss ein Fehler sein, d. h. welchen Widerstand darf er höchstens haben, damit man seine Lage genau bestimmen kann. Diese Frage durch eine bestimmte stets anwendbare Regel zu beantworten, ist nicht möglich, da unter verschiedenen Umständen verschiedene Forderungen zu erfüllen sind. Im Allgemeinen muss der Widerstand des Fehlers so beschaffen sein, dass die folgenden beiden Bedingungen erfüllt sind.

1. Mit der zur Verfügung stehenden Batterie muss man einen für die Ausführung der Messung hinreichenden Strom durch den Fehler treiben können.
2. Der Widerstand des Fehlers muss klein sein im Vergleich zu dem Isolationswiderstande des übrigen Kabels und seiner Anschlüsse.

Der Einfluss der zweiten Bedingung auf die Genauigkeit der Messung lässt sich rechnerisch durch folgende Betrachtung schätzungsweise angeben. In der Schleife $C\,M$ (Fig. 94) sei D die durch die Messung angegebene Lage des Fehlers, $C\,D = x$; die in Folge mangelhafter Isolation aus den übrigen Theilen des Kabels stattfindenden Stromentweichungen kann man sich ersetzt denken durch einen resultirenden Fehler, dessen Ort man in dem „Schwerpunkt" der Stromentweichungen annimmt. H sei die Lage dieses resultirenden Fehlers, $C\,H = y$. B sei der gesuchte wahre Ort des Fehlers $C\,B = b$. K sei der Isolationswiderstand der Schleife vor Ausbruch des Fehlers, demnach auch der Widerstand des resultirenden Fehlers in H, F der Isolationswiderstand der Schleife zur Zeit der Messung und f der Widerstand des Fehlers selbst.

Der Widerstand F ist gleich dem Verzweigungswiderstand von K und f

$$F = \frac{Kf}{K+f}$$

woraus sich ergiebt:

$$f = \frac{KF}{K-F}.$$

Nun ist es klar, dass sich die aus der Messung berechnete Lage des Fehlers D zwischen seinem wahren Orte B und dem Orte des resultirenden Fehlers H ergeben wird; die Entfernung des berechneten Ortes von den Punkten B und H wird abhängen von den relativen Werthen von f und K. So würde z. B. D in der Mitte

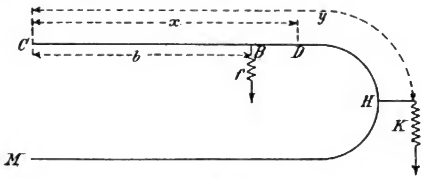


Fig. 94.

zwischen B und H liegen, wenn $K = f$ wäre. Man kann also ansetzen:

$$\frac{BD}{DH} = \frac{f}{K}$$

oder mit Einsetzen der Bezeichnungen:

$$\frac{x-b}{y-x} = \frac{f}{K}$$

$$b = x + \frac{f(x-y)}{K}.$$

Setzt man für f seinen Werth ein, so erhält man:

$$b = x + \frac{(x-y)F}{K-F}$$

oder

$$b = \frac{x - y\dfrac{F}{K}}{1 - \dfrac{F}{K}}. \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (91)$$

Vertheilen sich die Isolationsfehler gleichmässig über das ganze Kabel, so kann man die Lage des resultirenden Fehlers, den Schwer-

punkt der Stromentweichungen, in der Mitte der Kabelschleife annehmen; ist deren Gesammtlänge l, so wird also $y=\frac{l}{2}$ und Formel (91) nimmt die Gestalt an:

$$b=\frac{x-\frac{l F}{2 K}}{1-\frac{F}{K}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (91\,a)$$

Um eine Vorstellung von der Grösse der Abweichung zu bekommen, die durch den resultirenden Fehler in die Rechnung eingeht, wollen wir einen speciellen Fall betrachten. Es liege der resultirende Fehler in der Mitte der Schleife ($\frac{l}{2}$ vom Anfangspunkt entfernt) und die Lage des durch die Messung bestimmten Fehlers ergebe sich zu $^1/_4$ der gesammten Kabellänge vom Anfangspunkte entfernt. Dann wird, wenn $F=\frac{1}{10} K$ ist, die Messung um 10% falsch, wenn $F=\frac{1}{100} K$ ist, wird die Messung um 1% falsch.

Eine Schwierigkeit besteht darin, die wirkliche Lage des resultirenden Fehlers anzugeben. In gewissen Fällen kann man dieselbe wohl vermuthen oder schätzen, in anderen Fällen sie mit ziemlicher Sicherheit in die Mitte des Kabels zu verlegen, immer bleibt sie jedoch mit einer beträchtlichen Unbestimmtheit behaftet. Eine Fehlerbestimmung kann daher nur dann Anspruch auf absolute Genauigkeit haben, wenn der Fehlerwiderstand des übrigen Kabels und seiner Anschlüsse sehr gross ist gegen f. Wenn eine Schleife aus mehreren verschiedenen Kabelstücken besteht, so hat man zu unterscheiden zwischen dem wirklichen Mittelpunkt der Schleife und dem Mittelpunkt der äquivalenten Länge. Nimmt man den ersteren als Ort des resultirenden Fehlers an, so ist sein äquivalenter Abstand vom Anfangspunkte in die Gl. (91a) einzusetzen.

Eine andere Schwierigkeit, welche auftritt, wenn der Isolationswiderstand des Netzes so niedrig ist, dass er mit dem Widerstande des Fehlers vergleichbar wird, besteht darin, dass man die Brücke schwer auf ihr Gleichgewicht einstellen kann, da Lage und Grösse des resultirenden Fehlers vielfachen Schwankungen unterworfen sind.

Die gemachten Ausführungen sind ohne Weiteres auch auf den Fall zu übertragen, dass zwei Fehler zugleich in einem Kabel vor-

handen sind; auch dann ergiebt sich aus der Messung ein scheinbarer Fehlerort, der zwischen den wirklichen Fehlerstellen liegt, und zwar näher an dem Fehler mit geringerem Widerstande.

Die Formeln (91) resp. (91a) lassen sich in diesen Fällen zur Bestimmung der Lage des einen Fehlers benutzen, wenn die des anderen Fehlers, sowie die Widerstände der Fehler, bekannt sind. Lassen sich die letzteren Grössen stets auch nur schätzungsweise ermitteln, so können die Formeln doch in einigen Fällen von Werth sein, zumal die Aufgabe, zwei zugleich in einem Kabel vorhandene Fehler zu bestimmen, unter Benutzung elementarer Hilfsmittel nicht lösbar ist.

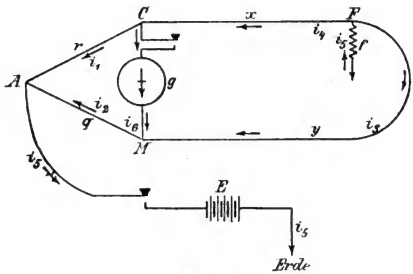


Fig. 95.

68. Wir wollen uns nun zur Beantwortung der Frage wenden, wie niedrig der Widerstand eines Fehlers mindestens sein muss, damit man seinen Ort mit einem gegebenen Grade von Genauigkeit bestimmen kann. Wir können das Problem auch in der Form fassen: Mit welcher Genauigkeit lässt sich ein Fehler von bekanntem Widerstande mit einem Instrumentarium von gegebener Empfindlichkeit bestimmen?

Der Lösung der Aufgabe legen wir die Annahme zu Grunde, dass die Messung unter Benutzung eines Schleifdrahtes, nach Murray's Schleifenmethode ausgeführt wird, da sich so die einfachsten Verhältnisse ergeben. Die Brückenschaltung sei nach Fig. 95 angeordnet, der Widerstand der Kabelschleife sei l, der Widerstand der Theile $CF = x$, $MF = y$, sodass $l = x + y$ ist. Der Schleifdraht habe den Widerstand s, und im Gleichgewicht der Brücke sei $CA = r$, $AM = s - r = q$. Wir wollen nun zunächst annehmen, der Schleif-

kontakt A befinde sich noch nicht in der Nullstellung, sondern noch ein kleines Stück von ihr entfernt. Für diese Lage sei $CA = r_1$, $AM = q_1$. Auch jetzt ist natürlich wieder $r_1 + q_1 = s$. f sei der Widerstand des Fehlers, gegen den der Widerstand der Batterie zu vernachlässigen ist, g der Galvanometerwiderstand und E die elektromotorische Kraft der Batterie.

Die Stromstärken in den vier Zweigen der Brücke mögen respektive mit i_1, i_2, i_3, i_4, der Strom im Batteriekreis mit i_5, der im Galvanometerkreis mit i_6 bezeichnet werden. Dann ergeben die Kirchhof'schen Gesetze die Gleichungen:

$$
\begin{aligned}
i_5 - i_4 - i_3 &= 0 \\
i_4 - i_6 - i_1 &= 0 \\
i_3 - i_6 - i_2 &= 0 \\
i_5 f + i_3 y + i_2 q_1 - E &= 0 \\
i_1 r_1 - i_2 q_1 - i_6 g &= 0 \\
i_3 y - i_4 x - i_6 g &= 0
\end{aligned}
$$

Eliminirt man $i_1\, i_2\, i_3\, i_4\, i_5$ aus diesem Gleichungssystem, so erhält man für die Stärke des das Galvanometer durchfliessenden Stromes den Ausdruck:

$$
= \frac{E(r_1 y - q_1 x)}{g\left\{(r_1 + x)(q_1 + y) + f(r_1 + q_1 + y + x)\right\} + f(y + x)(r_1 + q_1) + q_1(r_1 + x) + r_1 x(q_1 + y)} . \quad (92)
$$

Da die Stellung des Schleifkontaktes A nur sehr wenig von der Gleichgewichtslage entfernt ist, so können wir ohne merklichen Fehler im Nenner setzen:

$$
\frac{r_1}{q_1} = \frac{r}{q} = \frac{x}{y} \qquad \text{oder} \qquad q_1 = r_1 \frac{y}{x} .
$$

Die gleiche Substitution im Zähler des Ausdruckes (92) wäre nicht zulässig, da dann die ganze rechte Seite der Gleichung (92) verschwinden würde.

Führt man noch

$$
x + y = l
$$

in Gleichung (92) ein, so nimmt diese die Form an:

$$
i_6 = \frac{E x (r_1 y - q_1 x)}{\left\{g(r + x) + r l\right\}\left\{f l + y(r + x)\right\}} \quad . \quad . \quad . \quad (93)
$$

Wir wollen nun annehmen, dass i_6 die kleinste Stromstärke sei, die an der Galvanometerskala gerade noch eine sichtbare Ablenkung hervorruft, und dass sie derjenigen Einstellung des Schleifkontaktes A entspricht, bei welcher der Schleifdraht in die beiden Abschnitte $r_1\, q_1$ anstatt $r\, q$ getheilt wird. Berechnet man den Ort des Fehlers aus dieser Ablesung r_1, so würde man einen gewissen Fehler begehen. Unter Anwendung der gewöhnlichen Gleichung $\frac{r_1}{s} = \frac{x_1}{x+y}$, würde sich für den Ort des Fehlers ergeben:

$$x_1 = \frac{r_1}{s}(x+y) \quad \ldots \ldots \ldots \quad (94)$$

Die Bestimmung x_1 ist indessen mit einem gewissen Fehler λ behaftet, so dass

$$x_1 = x + \lambda$$

ist, wo λ je nach den besonderen Umständen einen positiven oder negativen Werth haben kann.

Setzt man diesen Werth in Gleichung (94) ein, so folgt;

$$\begin{aligned} r_1 (x+y) &= (x+\lambda)\, s \\ r_1\, y &= (s - r_1)\, x + \lambda\, s \\ &= q_1\, x + \lambda\, s \\ r_1\, y - q_1\, x &= +\lambda\, s. \quad \ldots \ldots \ldots \quad (94\text{a}) \end{aligned}$$

Setzt man den aus Gleichung (94a) folgenden Werth für $r_1\, y - q_1\, x$ in Gleichung (93) ein, so ergiebt sich:

$$i_6 = \frac{E\, x\, \lambda\, s}{\left\{g\,(r+x) + r\, l\right\}\left\{f\, l + y\,(r+x)\right\}} \quad \ldots \quad (95)$$

Ersetzt man weiter im Nenner y durch $l - x$ und r durch $\frac{x\, s}{l}$, so nimmt Gleichung (95) schliesslich nach einigen leichten Umformungen die Gestalt an:

$$i_6 = \frac{E\, \lambda}{(g\, s + g\, l + s\, l)\left(\frac{f}{s} + \frac{x}{s} + \frac{x}{l} - \frac{x^2}{l\, s} - \frac{x^2}{l^2}\right)} \quad \ldots \quad (95\text{a})$$

Da wir von der Voraussetzung ausgehen, dass der Widerstand des Fehlers f gross ist, so können wir in der zweiten Klammer des

Nenners alle übrigen Glieder gegen das erste Glied vernachlässigen; dadurch vereinfacht sich Gleichung (95a) noch weiter zu:

$$i_6 = \frac{E\lambda}{\frac{f}{s}(gs + gl + sl)} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (95\,b)$$

und man erhält für λ den Werth:

$$\lambda = \frac{i_6 f}{E}\left(g + \frac{gl}{s} + l\right). \quad \ldots\ldots\ldots \quad (96)$$

Ist V diejenige Potentialdifferenz, welche die kleinste an der Galvanometerskala noch sichtbare Ablenkung hervorruft, also nach früheren Ausführungen die Empfindlichkeitskonstante des Instruments, so kann man für i_6 setzen: $\frac{V}{g}$. Dann wird:

$$\lambda = \frac{Vf}{E}\left(1 + \frac{l}{s} + \frac{l}{g}\right). \quad \ldots\ldots\ldots \quad (97)$$

Durch die rechte Seite des Ausdrucks wird der der Messung anhaftende Fehler in Ohm angegeben; um ihn in Metern zu erhalten, d. h. die Genauigkeit zu erhalten, mit der der Abstand des Fehlerortes vom Anfangspunkte des Kabels bestimmt werden kann, haben wir die Gleichung noch zu multipliciren mit $\frac{L}{l}$, wo L die Länge der Kabelschleife bedeutet. Es ist also die mögliche Abweichung des aus der Messung berechneten Fehlerortes von dem wahren

$$\varDelta = \frac{Vf}{E}\left(\frac{1}{l} + \frac{1}{s} + \frac{1}{g}\right) L. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (98)$$

Wir wollen nun daran gehen, dieses einfache Resultat zu diskutiren und auf einen bestimmten Fall anzuwenden.

Die Abweichung $\varDelta$ nimmt zu mit dem Widerstande des Fehlers und ist um so kleiner, je empfindlicher das Instrumentarium ist (kleines V, grosses E).

Benutzt man anstatt eines Schleifdrahtes eine Widerstandsbrücke, so führt die Vernachlässigung der Klammerglieder, die f nicht enthalten, in Gleichung (95a) zu nicht mehr genau richtigen Resultaten, falls s von derselben Grössenordnung ist wie f. Solange f jedoch grösser ist als s, wird Formel (95a) wenigstens mit grosser Annäherung giltig sein, da sämmtliche Klammerglieder ausser $\frac{f}{s}$ echte Brüche

sind, also gegen $\frac{f}{s}$ nur wenig ins Gewicht fallen können. Die Vernachlässigung der Klammerglieder hat zur Folge, dass der wirkliche Werth für λ etwas grösser ist als der sich aus der Rechnung ergebende.

Abgesehen von der angegebenen Ausnahme sieht man aus Gleichung (98), dass mit wachsendem s für einen bestimmten Werth von f die Abweichung $\varDelta$ kleiner wird. Indessen ist auch nicht annähernd $\varDelta$ umgekehrt proportional der Grösse s, da das Glied $\frac{1}{l}$ in der Klammer bei elektrischen Starkstromkabeln, die in der Regel einen geringen Leitungswiderstand besitzen, ausserordentlich viel mehr ins Gewicht fällt wie die beiden anderen Summanden. Obwohl also grundsätzlich mit einem Widerstandskasten wegen des höheren Werthes von s ein grösserer Genauigkeitsgrad zu erreichen ist, so ist derselbe doch nicht so erheblich, um besonders bei Messungen auf der Strecke die Bequemlichkeit des Schleifdrahtes aufzuwiegen. Die Entscheidung, ob Schleifdraht oder Widerstandskasten zu benutzen sei, braucht also durch Erwägungen nach dieser Richtung hin nicht beeinflusst zu werden.

Der Anwendung der Gleichung (98) ist noch eine andere Grenze gesteckt, die, obwohl eigentlich selbstverständlich, doch hier Erwähnung und kurze Erläuterung finden möge. Wenn beispielsweise die Länge des zu der Messung benutzten Schleifdrahtes 1000 mm beträgt und es höchstens möglich ist, die Einstellung des Schleifkontaktes auf $^1/_2$ mm abzulesen, so kann augenscheinlich keine grössere Genauigkeit als $^1/_{2000}$ der Länge der Kabelschleife erreicht werden, welches Resultat auch die Berechnung aus Gleichung (98) ergeben mag. Durch die Genauigkeit der Einstellung des Schleifkontaktes ist also die Empfindlichkeit begrenzt.

In der gleichen Weise ist bei Anwendung einer Widerstandsbrücke die Empfindlichkeit beschränkt durch die kleinste Unterabtheilung, auf die sich der Widerstand noch einstellen lässt. Ist z. B. im Gleichgewichtszustande $r + q = 3000$ Ohm und stehen Bruchtheile des Ohm in der Brücke nicht zur Verfügung, so ist ein Fehler möglich, der höchstens $^1/_2$ Ohm beträgt, so dass der Fehler im Messresultat $^1/_{6000}$ der ganzen Kabellänge ausmacht.

Aus diesen Betrachtungen ist also zu ersehen, dass in der Regel sowohl bei dem Schleifdraht wie bei der Messbrücke die Einstellungs-

genauigkeit so hoch ist, dass der aus dieser Quelle fliessende Fehler zu vernachlässigen ist.

69. Wir wollen nun einen speciellen Fall behandeln und sehen, wie sich die Anwendung der Formel (98) praktisch gestaltet. Angenommen, der Widerstand der Schleife, die den Fehler enthält, betrage $l = 0{,}08$ Ohm, der Widerstand s des Schleifdrahtes ist 0,3 Ohm und der Galvanometerwiderstand 50 Ohm. Die Galvanometerkonstante V sei $3{,}10^{-5}$ Volt und die E.M.K. der zur Verfügung stehenden Batterie betrage 100 Volt. Die Schleife selbst ist 400 m lang. Welchen Widerstand darf dann höchstens der Fehler haben, wenn die Genauigkeit der Fehlerbestimmung 1 % der Schleifenlänge betragen soll?

Unter den gegebenen Umständen ist $\Delta = 4$ (1 % von 400) und

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{s} + \frac{1}{g} = \frac{1}{0{,}08} + \frac{1}{0{,}3} + \frac{1}{50} = 12{,}8 + 3{,}3 + 0{,}2 = \text{etwa } 15.$$

Gleichung (98) wird dann:

$$4 = \frac{3 \times 10^{-5}}{100} \, . f \, 15 \, . \, 400$$

$$f = \frac{10^5}{45} = \text{etwa } 2200 \text{ Ohm}.$$

Vor der endgiltigen Annahme dieses Werthes ist indessen noch zu entscheiden, ob der Widerstand des Fehlers auch klein genug ist, verglichen mit dem normalen Isolationswiderstande des Netzes, damit die Genauigkeit der Bestimmung nicht beeinträchtigt wird durch die Anwesenheit eines resultirenden Fehlers von unbekannter Lage, der durch mangelhafte Isolation anderer Theile des Netzes bedingt ist (vgl. § 67).

70. Handelt es sich um Messungen in Gleichstromnetzen, so kann man den zu den Messungen nöthigen Strom direkt den Sammelschienen oder anderen Theilen des Netzes entnehmen. Dieselben treten dann in den Figuren an die Stelle der Batterie. Wenn irgend möglich, ist es allerdings vorzuziehen, eine besondere Batterie oder kleine Maschine zu benutzen, damit man das Netz nicht einpolig an Erde zu legen braucht. Ist man bei Messungen auf der Strecke doch dazu gezwungen, so sollte man jedenfalls in die Erdleitung einen Widerstand von passender Grösse einschalten, damit man keinen totalen Erdschluss im Netz hervorruft. Varley's Methode

ist unter diesen Umständen nicht anwendbar; man ist für Schleifenmessungen auf Murray's Methode beschränkt.

Bei Anwendung der Methoden des Spannungsabfalls ergiebt sich bei Stromentnahme aus dem Netz ganz besonders die Schwierigkeit, die Stromstärke konstant zu halten. Für die anderen Methoden fällt diese Störung weniger ins Gewicht, da es Nullmethoden sind.

Ist man in Wechselstromnetzen gezwungen, den Messstrom dem Netz zu entnehmen, so ist das Galvanometer durch ein Telephon zu ersetzen. Unter diesen Umständen kann aber eine erhebliche Fehlerquelle durch die Ladungsströme des Netzes auftreten.

Fünftes Kapitel.

Fehlerbestimmungen während des Betriebes.

71. Induktionsmethoden. Die Induktionsmethoden beruhen auf dem Princip der Induktionsspule oder des Transformators. Ueber das zu untersuchende Kabel *C* (Fig. 96) wird eine dreieckige Spule *D* gehalten, die aus mehreren Windungen besteht. Diese Windungen liegen parallel den Seiten des Dreiecks, die Spule selbst ist so angeordnet, dass eine Seite derselben dem Kabel parallel läuft.

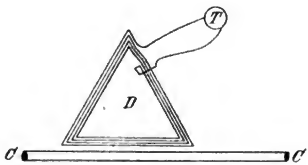


Fig. 96.

Wenn nun in *C* irgend welche plötzlichen Stromschwankungen auftreten, so wird eine momentane E.M.K. in der Spule *D* inducirt, und ein Stromstoss wird ein in diese eingeschaltetes Galvanometer oder Telephon durchfliessen. Wird der Strom in *C* in rascher Folge mehrmals sekundlich unterbrochen und geschlossen, so hört man ein knackendes Geräusch in dem Telephon, während ein Wechselstrom in *C* sich durch ein Summen des Telephons bemerkbar macht. Eine derartige Spule nennt man Fehlersuchspule, man kann sie als die eine Wicklung eines Transformators betrachten, dessen andere Wicklung das Kabel darstellt.

Wir wollen zunächst den Fall eines Niederspannungsnetzes betrachten, das in eine Anzahl von Unterabschnitten *a*, *b*, *c*, *d* getheilt

ist, die von denselben Sammelschienen gespeist werden, im Uebrigen aber unabhängig von einander sind (Fig. 97). Die regelmässigen Isolationsmessungen in der Centrale, nach einer der schon beschriebenen Methoden ausgeführt, mögen einen Fehler in der positiven Hälfte des Netzes ankünden. Man hält dann die mit Galvanoskop oder Telephon versehene Fehlersuchspule zunächst gegen den Leiter a, während die negative Sammelschiene für einen Augenblick an Erde gelegt wird. Befindet sich der Fehler in $+a$, so wird der Strom durch diesen Leiter in Folge der Erdung der negativen Sammelschiene plötzlich anwachsen, in der Spule wird ein Stromstoss inducirt, und das Galvanoskop giebt einen Ausschlag beziehungs-

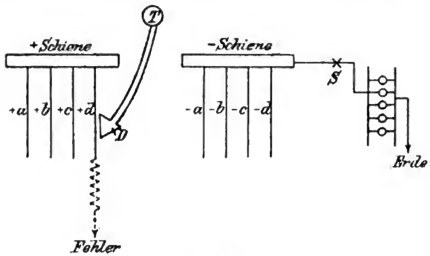


Fig. 97.

weise das Telephon einen Ton. Erfolgt etwas derartiges nicht, so wird der nächste Leiter b in der gleichen Weise untersucht und so fort, bis man das fehlerhafte Kabel gefunden hat. Es ist möglich, dass ein schwacher Strom auch bei Annäherung an die gesunden Leiter die Spule durchfliesst, jedoch ist das fehlerhafte Kabel durch seine bei weitem stärkere Induktionswirkung unschwer herauszufinden. Fig. 97 stellt schematisch die Schaltung dar, wenn der Fehler in dem Leiter $+d$ liegt. D ist die Spule, T das Galvanoskop oder Telephon. Anstatt die negative Sammelschiene direkt zu erden, wird in die Erdleitung ein Lampenwiderstand eingeschaltet, der mit dem Fehler in Reihe ein zu starkes Anwachsen des Stromes in dem fehlerhaften Kabel verhindert. Bei Gebrauch eines Telephons schaltet man in die Erdleitung zweckmässig einen Ausschalter S, der eine rasche Unterbrechung und Wiederherstellung der Erdverbindung erlaubt.

Es sei bemerkt, dass das Ein- und Ausschalten von Lampen oder sonstigen Verbrauchsapparaten im Stromkreis ebenfalls Induktionserscheinungen in der Spule hervorruft, das Telephon also zum Tönen bringt. Indessen lassen sich durch mehrmalige Wiederholung der Messungen die störenden Einflüsse dieser Wirkungen beseitigen.

Hat man ein geschlossenes oder sonst in sich zusammenhängendes Netz zu untersuchen, das durch eine grössere Anzahl von Speiseleitungen gespeist wird (anstatt, dass, wie das eben betrachtete, jeder Abschnitt sein besonderes Feederpaar hat), so liefert die beschriebene Methode zu Zeiten geringer Belastung ebenfalls brauchbare Resultate. Der dem Fehler am nächsten liegende Speiseleiter wird dann den stärksten Strom in der Spule hervorrufen, und der Fehler wird zwischen diesem Leiter und demjenigen liegen, der den zweitstärksten Strom in ihr inducirt.

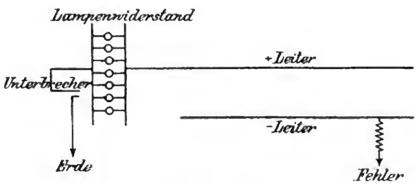


Fig. 98.

Um eine nähere Angabe über die Lage des Fehlers zu erhalten, ohne die einzelnen Verbindungen zu lösen, kann man die beschriebene Methode insbesondere auf der Strasse benutzen. Der gesunde Leiter wird nach Fig. 98 über einen Unterbrecher und einen Widerstand geerdet. Man hält sodann die Spule, bei der Centrale beginnend, über das fehlerhafte Kabel und verfolgt die Trace desselben. Dann hört man einen Ton in dem Telephon. Dieser Ton verschwindet an der Stelle, wo sich der Fehler befindet. Immerhin ist jedoch diese Methode, den Fehlerort im Kabel zu bestimmen, nur mit Vorsicht anzuwenden. Besteht das Netz aus blanken, isolirt verlegten Kupferschienen, oder aus Kabeln, die ohne Bleimantel in nichtmetallischen Röhren verlegt sind, so wird man allerdings verhältnissmässig sichere Resultate erzielen. Sind die Kabel jedoch umbleit oder armirt oder in eiserne Röhren eingezogen, so wird der Ton im Telephon an der Fehlerstelle nur schwächer und hört

erst dort gänzlich auf, wo der fortlaufende, das Kabel umgebende Metallmantel eine Unterbrechung erfährt. Der grösste Theil des aus dem Fehler entweichenden Stromes läuft in diesem Falle längs der Armirung nach beiden Richtungen vom Kabel hin und fliesst nur nach und nach zur Erde. In solchen Fällen ist selbst eine schätzungsweise Bestimmung der Stelle schwierig, an der die Tonabnahme beginnt. Läuft der Metallmantel um das Kabel gänzlich ohne Unterbrechung fort, so hört man in dem Telephon überhaupt nur einen sehr schwachen oder gar keinen Ton.

Die Methode ist mit den erwähnten Einschränkungen anwendbar ebensowohl auf Dreileiternetze, deren Mittelleiter nicht dauernd geerdet ist, wie auf Zweileiternetze. Sie versagt indessen bei kon-

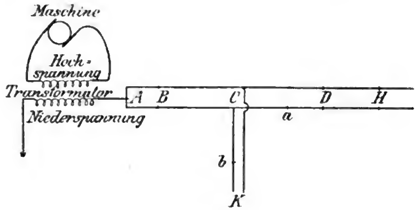


Fig. 99.

centrischen Kabeln während des Betriebes, wenn der Fehler nicht nur zwischen innerem und äusserem Leiter, sondern auch gegen Erde liegt.

Fehler in Hochspannungsleitungen können ebenfalls auf die beschriebene Weise gesucht werden, jedoch nicht während des Betriebes, da es nicht angängig ist, einen der Pole intermittirend zu erden. In der Centrale zu Troyes ist die Methode mit Erfolg auf das dortige Hochspannungsnetz angewandt worden. Die dort liegenden Kabel sind Bleikabel, deren Bleimantel jedoch an allen Abzweigestellen und Verbindungsmuffen unterbrochen ist. Man beobachtet nun, bei welcher Muffe das Summen im Telephon aufhört und untersucht dann die vorhergehende Muffe, wo sich in der Regel der Fehler vorfindet. Die Schaltung ist nach Fig. 99 vorgenommen. Das fehlerhafte Kabel $A\,H$ und sein Nachbarkabel sind von der Maschine getrennt und am einen Ende A mit einander verbunden. Dieses Ende wird mit der einen Niederspannungsklemme eines Transfor-

mators verbunden, dessen andere Klemme geerdet ist, während die Hochspannungswickelung desselben auf die Maschine geschaltet wird. Die Punkte *B C D H* stellen Muffen dar, an denen, wie schon bemerkt, die Kontinuität des Bleimantels unterbrochen ist. Findet man nun beim Begehen der Strecke mit Spule und Telephon, dass das Summen im Telephon von Punkt *D* ab gänzlich aufhört, so liegt der Fehler entweder in *C* oder zwischen *C* und *D* oder zwischen *C* und *K*. Hat man entschieden, wo die Abnahme des Tons beginnt, ob in *C* oder in einem Punkte *a* zwischen *C* und *D*, oder einem Punkte *b* auf der Strecke *C K*, so ist der Ort des Fehlers zu finden.

In Wechselstrom-Niederspannungsnetzen ist die Schaltung ganz analog der bei Gleichstrom, nur mit Fortlassung des Unterbrechers. Uebrigens geben auch Bogenlicht-Maschinen der Brush- oder Thomson-Houston-Type einen Strom, der ohne Anwendung eines Unterbrechers genügend diskontinuirlich für die Ausführung der Messungen ist.

Ist die Benutzung eines Unterbrechers erforderlich, so leisten eine elektrische Klingel mit abgebogenem Klöppel oder die Primärspule eines Induktoriums mit seinem Unterbrecher gute Dienste, wenn man nur einen schwachen Strom durch die Fehlerstelle zu senden braucht, wie in den Fällen, wo man die Fehlersuchspule sehr nahe an die fehlerhafte Leitung heranbringen kann. Die zur Fehlerbestimmung mindestens erforderliche Stromstärke hängt ausser der Entfernung der Spule vom Kabel von der Windungszahl der Spule und von der Beschaffenheit des Netzes ab. Der Strom, der in einem „blanken“ Netz ein lautes Brummen im Telephon erzeugt, kann unter Umständen bei Bleikabeln ohne jede Wirkung auf die Spule bleiben. Handelt es sich daher für solche Netze um die Anwendung stärkerer Ströme, so ist ein von Hand zu bethätigender Kontaktmacher oder ein rotirender Unterbrecher irgend welcher Art nothwendig. Fig. 100 zeigt eine Anordnung, wie sie in der Edison-Centrale zu Detroit in Gebrauch ist. Der Haupttheil des Apparates besteht aus dem Regulator einer kleinen Dampfmaschine, welche die automatische Feuerung treibt. Ein eiserner Arm, an dem Gestell des Regulators befestigt, trägt einen Holzblock, auf dem ein Metallstück sitzt. Das Gestell ist zur Erde abgeleitet, während das Metallstück zu der einen Klemme eines Lampenwiderstandes geht, dessen andere Klemme mit dem gesunden Leiter des Netzes verbunden ist.

Wenn der Regulator rotirt, so findet durch das Anschlagen der Kugeln gegen das Metallstück sekundlich eine mehrmalige Unterbrechung statt.

Recht zweckmässig zur Unterbrechung stärkerer Ströme für den vorliegenden Zweck kann sich vielleicht auch der in neuester Zeit von Wehnelt angegebene „elektrolytische" Unterbrecher erweisen, insbesondere in der ihm von Simon gegebenen Modifikation. Der ausserordentlich einfache Apparat besteht aus einem mit verdünnter Schwefelsäure (Dichte 1,16—2,0) gefülltem isolirenden Gefäss (Fig. 101), das durch eine völlig dicht schliessende isolirende Zwischenwand in zwei Theile getheilt ist. In jedem der beiden Theile steht eine Bleiplatte als Elektrode. Die Scheidewand hat in ihrer Mitte ein feines Loch von 1—2 mm Durchmesser, an dem sich der Unterbrechungsvorgang

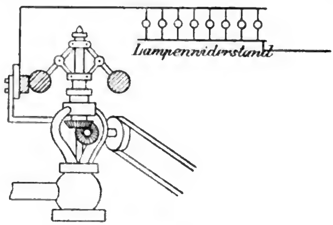


Fig. 100.

abspielt. Durch die gesteigerte Stromdichte findet nämlich an dieser Stelle eine lokale Erwärmung statt, welche eine Verdampfung der Flüssigkeit an der Verengung zur Folge hat. Dadurch wird der Strom unterbrochen, die Flüssigkeit kühlt sich ab, die Stromstärke stellt sich wieder her, und das Spiel wiederholt sich von Neuem, auf diese Weise zu einer sehr hohen Zahl von Unterbrechungen Veranlassung gebend. Da der Apparat einen beträchtlichen Eigenwiderstand besitzt, so kann er ohne Vorschaltwiderstand direkt an die Netzspannung angeschaltet werden.

Die dreieckige Form der Spule ist die zumeist benutzte und in ihrer Handhabung am bequemsten. Die Grösse der Spule sowie ihre Windungszahl richtet sich nach der Art des Netzes sowie nach der maximalen Stromstärke, die das fehlerhafte Kabel durchfliessen soll. Als Spule von mittleren Dimensionen ist eine solche von etwa 1 m Seitenlänge zu wählen mit 100 oder 200 Windungen Draht von

etwa 0,4 mm Durchmesser. Die bei den Versuchen zu Troyes verwandte Spule hatte eine Seitenlänge von über 3,5 m und war mit nur 25 Windungen Kupferdraht von 0,8 mm Durchmesser bewickelt. Zweifellos leistet indessen eine Spule von geringeren Dimensionen und grösserer Windungszahl dieselben Dienste.

Hat man Fehlerbestimmungen in Leitungen zu machen, in denen nur eine geringe Stromstärke herrscht, so kann man einen kleinen Induktionsapparat oder Transformator anstatt der Suchspule benutzen. Die dickdrähtige Spule wird an der zu prüfenden Stelle in den Stromkreis eingeschaltet, so dass sie von dem Strom des Netzes durchflossen wird. Wenn dann bei Erdung des anderen Poles die Stromstärke in dem fehlerhaften Leiter wächst, so wird in dem an die sekundäre Windung des Transformators angeschlossenen

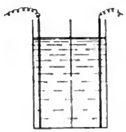


Fig. 101.

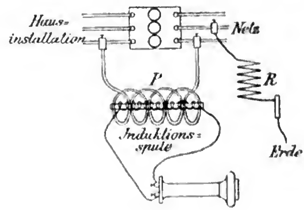


Fig. 102.

Telephon ein Strom inducirt. Diese Modifikation der Induktionsmethode ist besonders für kleinere Abzweigungen und Hausinstallationen gut brauchbar. Fig. 102 zeigt ihre Anwendung auf eine Hausinstallation in einem Dreileiternetz. Die dickdrähtige Spule ist parallel zu der Sicherung an die Leitung angeschlossen; die Sicherung ist herausgeschraubt, so dass der Strom die Spule durchfliessen muss. Erdet man dann die gesunde Leitung durch einen Widerstand und einen Unterbrecher, so wird, falls der Fehler in dem betreffenden Hause liegt, das Telephon einen Ton geben. Die Messung kann an jeder Abzweigung in dem Hause durch Einschalten der Spule an Stelle der betreffenden Sicherung vorgenommen und auf diese Weise der Ort des Fehlers innerhalb ziemlich enger Grenzen bestimmt werden.

Bei der im Vorigen beschriebenen Methode kann man nach dem Vorschlag von Thayer Induktionsspule und Telephon auch ersetzen

durch eine Glühlampe oder ein Galvanoskop. Die Schaltung bleibt genau dieselbe, wie in Fig. 102 angegeben, doch darf jetzt der Widerstand R nicht zu gross sein, und die Lampen in dem betreffenden Hause müssen ausgeschaltet werden. Fliesst Strom durch das Galvanoskop oder glüht die Lampe, falls der andere Leiter über den Widerstand R geerdet wird, so liegt der Fehler in dem Hause, und man wiederholt die Prüfung an jeder Abzweigsicherung, bis man die fehlerhafte Zweigleitung herausgefunden hat.

72. Hat man durch die Induktionsmethode oder eine andere Methode bestimmt, welches die dem Fehler nächste Speiseleitung ist, so trennt man den Feeder an dem betreffenden Speisepunkte von der Vertheilungsleitung ab und prüft, ob der Fehler in dem Feeder selbst liegt oder nicht. Ist ersteres der Fall, so wird der

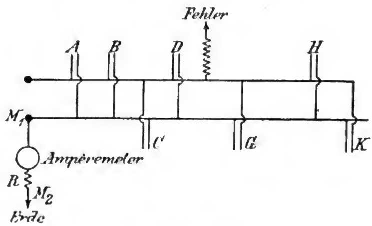


Fig. 103.

Speiseleiter des anderen Poles an dem Speisepunkte ebenfalls abgetrennt, die beiden Kabel zu einer Schleife verbunden und der Ort des Fehlers in der Schleife nach Murray's Methode bestimmt.

Befindet sich der Fehler in der Vertheilungsleitung, so kann man die Schaltung von Latch (Fig. 103) verwenden, die im Princip eine Methode des Spannungsabfalls ist. Die Vertheilungsleitung wird von allen Feederpaaren getrennt, ausser von einem, so dass sie also nur von einem Ende aus gespeist werden kann. Dann wird die intakte Leitung an diesem Punkte über einen Widerstand und ein Ampèremeter an Erde gelegt. Der Widerstand ist so zu regeln, dass die Stromstärke der schwächsten Hausanschlussleitung angepasst ist, für den Fall, dass der Fehler in ihr liegen sollte. Nun wird die Spannung zwischen den Punkten M_1 und M_2 gemessen und dann zwischen den Abzweigleitungen in den Punkten

A, *B*, *C* . . . . Die Spannungsdifferenz zwischen den Enden dieser Leitungen wird gleichmässig fallen, so lange, bis die Fehlerstelle erreicht ist, hinter dem Fehler fällt sie jedoch nicht mehr weiter, behält vielmehr denselben Werth bei oder erreicht höchstens einen nur wenig höheren als zwischen M_1 und M_2. Angenommen also, der Fehler sei an dem in der Figur angedeuteten Orte, so fallen die Spannungsdifferenzen gleichmässig von *A* bis *D*, in den Punkten *G*, *H*, *K* etc. erhält man jedoch stets nahe dieselben Werthe. Nothwendige Bedingung für eine einigermaassen erhebliche Genauigkeit ist, dass die Messung zur Zeit geringer Belastung ausgeführt wird, damit der durch *R* fliessende Strom gross ist im Vergleich zu dem Nutzstrom in der Vertheilungsleitung. Wie ersichtlich, giebt die Methode nur an, zwischen welchen Paaren von Zweigleitungen der Fehler liegt, eine genaue Ortsbestimmung ist nicht möglich; immerhin dürfte die Methode wegen ihrer Einfachheit ab und zu gute Dienste leisten.

73. Schleifenmethoden. Die bereits in § 60 beschriebenen, von Frölich angegebenen Schaltungen der Schleifenmethode lassen sich mit einer kleinen, aber wichtigen Abänderung[1]) ohne Weiteres auch während des Betriebes anwenden. Jedoch sind die Messungen dann zur Zeit der geringsten Belastung anzustellen. Alle Speiseleitungen mit Ausnahme eines Paares, das die Speisung des Netzes übernimmt, werden von den Hauptschienen abgenommen. Zwischen benachbarten Feedern wird zunächst nach Fig. 85 die Schleife hergestellt. Wenn nöthig, schreitet man dann zum nächsten Feederpaare fort, um schliesslich, falls der Fehler in der Vertheilungsleitung liegt, die in Fig. 86 skizzirte Schaltung auszuführen. Die Messungen werden nun genau so angestellt, wie es l. c. beschrieben, nur mit dem einen wichtigen Unterschied, dass der Galvanometerschlüssel zuerst geschlossen, und das Gleichgewicht der Brücke auf den falschen Nullpunkt eingestellt werden muss. Gerade diese Forderung bildet aber die Schwierigkeit bei der Ausführung der Messung. Bei dem Schliessen des Galvanometerkreises wird das Galvanometer von einem relativ starken Strome durchflossen, da ja auch bei offenem Batteriekreis in der Brücke die Netzspannung herrscht, und der Lichtschein geht daher bis an das Ende der Skala, so dass eine Ablesung nicht möglich ist. Durch Anbringen eines Nebenschlusses

[1]) Vergl. Frölich, E. T. Z. 1893.

oder eines Richtmagneten kann man ihn zwar wieder in die Mitte der Skala bringen, doch versagt das letztere Mittel gerade bei den meistbenutzten Instrumenten nach dem Deprez-d'Arsonval-Typus. Bei anderen Instrumenten ist es jedenfalls einer Nebenschliessung vorzuziehen, da diese die Empfindlichkeit des Galvanometers herabsetzt, während der Richtmagnet so eingestellt werden kann, dass er ohne die Empfindlichkeit des Instruments zu verringern gerade nur die Stromwirkung aufhebt. Gegen einen zu starken Strom sind die Spulen des Galvanometers durch eine zweckmässig dimensionirte Schmelzsicherung zu schützen. Das Galvanometer kann man, falls eine geringere Genauigkeit genügt, durch ein Telephon mit Induktionsspule ersetzen. Die primäre Wickelung der Spule wird dann an Stelle des Galvanometers angeschlossen, und das Telephon mit der sekundäre Wickelung verbunden.

Eine zweite Schwierigkeit, welche die Einstellung auf den falschen Nullpunkt der Messung entgegenstellt, ist die Inkonstanz des Netzstromes, dieselbe hat eine ständige Veränderlichkeit der Lage des falschen Nullpunktes beziehungsweise der Stromstärke im Galvanometerkreise bei offenem Batteriekreis zur Folge und setzt, wenn sie die Messung nicht gänzlich unmöglich macht, doch die Genauigkeit derselben erheblich herab. Eine Batterie ist natürlich nicht erforderlich; dieselbe kann durch eine oder mehrere hintereinandergeschaltete Lampen ersetzt werden.

74. Die Methode von Frölich ist eine Modifikation der Methode von Hieke[1]). Hieke verwendet eine Schaltung wie sie in Fig. 104 angegeben ist. Eine Batterie B_1 ist zwischen zwei benachbarte Feeder M_3, M_4 geschaltet und ein Widerstandskasten beziehungsweise ein Schleifdraht a, b zwischen die Enden der zugehörigen Prüfdrähte P_3, P_4. Um die grossen Ausschläge des Galvanometers durch den Netzstrom zu vermeiden, wird dieser im Galvanometerkreise selbst kompensirt. Die Vernichtung des Netzstroms im Galvanometerzweige ist durch Gegenschaltung einer zweiten Batterie auf folgende Weise erreicht. Die eine Galvanometerklemme ist entweder mit dem Schleifkontakt des Schleifdrahts oder mit dem Verbindungspunkte der beiden Widerstände a, b des den Schleifdraht ersetzenden Widerstandskastens verbunden. Anderseits ist das Galvanometer an den einen Pol einer zweiten Batterie B_2 an-

[1]) E.T.Z. 1892.

geschlossen. Die Batterie B_2 ist ausserdem durch einen Widerstand kurz geschlossen, von dem ein Schleifkontakt E zur Erde geht. Diese Anordnung bildet also ein Potentiometer, welches gestattet, die störende E.M.K. des Netzes durch eine ihr entgegenwirkende E.M.K. aufzuheben, welche letztere in ihrer Grösse zu reguliren ist. Man verfährt so, dass man bei geschlossenem Galvanometerkreise die Stellung des Schleifkontaktes E so lange verändert, bis der zunächst vorhanden gewesene Ausschlag verschwindet. Ob der negative oder positive Pol von B_2 an das Galvanometerende des Potentiometers anzulegen ist, hat man durch einen Vorversuch zu entscheiden. Als Batterie B_2 kann man einige Akkumulatoren verwenden, in welchem Falle man indessen dem Schleifdraht einen ziemlich hohen Wider-

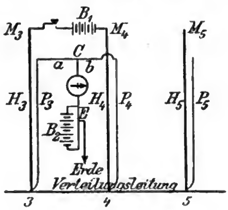


Fig. 104.

stand geben muss. Hieke selbst benutzte Bunsen-Elemente, sein Potentiometer bestand aus einem auf zwei Cylinder aufgespulten Draht. Bei der Hieke'schen Schaltung sind gegenüber der von Frölich (Fig. 85) Batteriezweig und Galvanometerzweig miteinander vertauscht.

Hieke's Methode, den störenden Galvanometerstrom selbst aufzuheben, anstatt ihn durch einen Nebenschluss zu schwächen oder durch einen Richtmagneten nur seine Wirkungen zu beseitigen, kann man natürlich auf Frölich's Anordnung ebenfalls übertragen. Die Hieke'sche Methode hat den Vortheil, dem Galvanometer seine höchste Empfindlichkeit zu lassen, und vermeidet zudem die Gefahr, dass durch einen zu starken Strom die Galvanometerspulen verbrannt werden, während man sich im anderen Falle infolge der durch den Richtmagneten aufgehobenen Ablenkung über die wahre Stärke des Galvanometerstromes leicht täuschen kann. Anderseits liegt ihr Nachtheil auf der Hand: sie komplicirt die Messungen, da sie eine zweite Batterie und einen zweiten Schleifkontakt nebst Zubehör erforderlich macht.

Nachdem die Galvanometerablenkung kompensirt ist, bleibt der Galvanometerschlüssel ständig geschlossen, und die Brücke wird durch Veränderung des Schleifkontakts eingestellt, bis die Ablenkung bei offenem und geschlossenem Batteriekreis gleich bleibt. Befindet sich die Gleichgewichtslage von C am Ende des Schleifdrahtes, so wird aus den beiden nächsten Speisekabeln mit ihren Prüfdrähten, je nach der aus der Messung sich ergebenden Richtung rechts oder links von den zuerst gewählten, wie auf S. 129 beschrieben, die Schleife gebildet. Ergiebt sich z. B. die Gleichgewichtslage am äussersten rechten Ende des Schleifdrahtes, so geht man zu $M_4 M_5$, $P_4 P_5$ (Fig. 104) über. Findet man nun den Gleichgewichtspunkt am

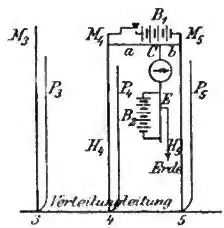


Fig. 105.

äussersten linken Ende des Schleifdrahtes, so liegt der Fehler entweder im Ende H_4 oder in dem Speisepunkte 4. Dann hat man die Schaltung der Fig. 105 zu wählen, also das Speisekabel H_4 in die Schleife mit einzubeziehen.

Es möge bemerkt werden, dass gegebenenfalls auch bei der Schaltung der Fig. 104 der Widerstand der Prüfdrähte resp. ihre äquivalente Länge, bezogen auf die des Schleifdrahtes a, b, mit in Rechnung gezogen werden kann.

Der Ort des Fehlers wird auf die übliche Weise berechnet. Sind die Verbindungen nach Fig. 104 ausgeführt, so ist der Abstand des Fehlers vom Punkte 3

$$\frac{a}{a+b}\, l,$$

wo l die Länge des Stückes der Vertheilungsleitung 3, 4 ist. Bei der Schaltung Fig. 105 ist für l die äquivalente Länge der Schleife, entweder bezogen auf den Querschnitt der Speisekabel oder auf den

der Vertheilungsleitung, in die Formel einzuführen. $\frac{a}{a+b}\,l$ ist dann der äquivalente Abstand des Fehlers von M_4, dem in der Centrale liegenden Ende des Feeders.

75. Um zu entscheiden, ob die Schaltung der Brücke von Hieke oder die von Frölich den Vorzug verdient, vergleichen wir Fig. 85 und Fig. 104 miteinander von dem Gesichtspunkt aus, dass wir der Anordnung den Vorzug geben, bei welcher der störende Strom im Galvanometerkreis weniger zur Geltung kommt, bei der also die sicherste Einstellung erzielt werden kann. In Fig. 104 (Hieke) liegt der Fehler im Galvanometerzweig; bei den stets wechselnden Werthen von Widerstand und elektromotorischer Kraft des Fehlers wird demnach auch die Galvanometernadel keine beständige Ruhelage einhalten können. Bei Frölich's Schaltung liegt der Fehler im Batteriekreis, kann also auf die Lage des falschen Nullpunkts keinen Einfluss ausüben. Indessen ist in diesem Falle das Galvanometer an zwei Punkte der Vertheilungsleitung angelegt, sodass jede Schwankung des Netzstroms sich im Galvanometer durch Aenderung der Nullpunktslage bemerkbar macht. Wird die Messung zur Zeit schwacher Belastung vorgenommen, so sind jedoch die Schwankungen wenig erheblich und auch immerhin nicht so störend, wie die aus der Wirksamkeit des Fehlers im Galvanometerkreise resultirenden. Im Allgemeinen ist also die Frölich'sche Anordnung vorzuziehen, wenn nicht gerade die Messung an einem stark belasteten Theile des Netzes auszuführen ist, in welchem Falle dann allerdings die beträchtlichen Schwankungen der Stromstärke des Netzes stören.

Einen grossen Vorzug vor den Induktionsmethoden und auch vor Latch's Methode des Spannungsabfalls haben die Schleifenmethoden nach der Richtung hin voraus, dass sie sich nur auf die fehlerhaften Leitungen des Netzes erstrecken, ohne die übrigen Theile desselben in Mitleidenschaft zu ziehen. Bei den anderen Methoden erweist es sich stets als nothwendig, die ganze gesunde Hälfte des Netzes zu erden, damit ein starker Strom durch die Fehlerstelle fliessen kann. Wenn auch diese Erdung nur auf Augenblicke statt hat, so muss sie doch, damit die Messungen brauchbare Resultate ergeben, öfters wiederholt werden, was Nachtheile mit sich führt.

76. Die Schleifenmethoden sind auch auf Wechselstromnetze zu übertragen; der zu der Messung erforderliche, einer gesonderten

kleinen Batterie zu entnehmende Gleichstrom, lagert sich dem Wechselstrom des Netzes über. Da der letztere ebenfalls die Brücke durchfliesst, ohne indessen die Galvanometernadel abzulenken, so ist um so mehr darauf zu achten, dass das Instrument und die Widerstandsspulen durch die übermässig anwachsende Stromstärke nicht beschädigt werden. Eine Schmelzsicherung leistet auch hier wieder gute Dienste.

77. J. Pigg[1]) hat eine Schleifenmethode angegeben, um Fehlerbestimmungen in Niederspannungsnetzen auszuführen. Dieselbe ist anwendbar auf kleinere Netze, die nur durch ein Feederpaar von

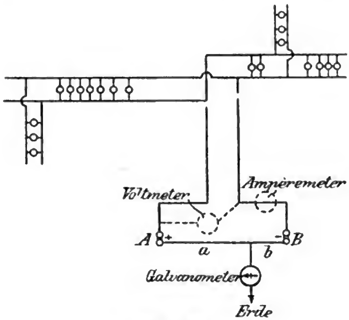


Fig. 106.

der Centrale aus gespeist werden und in solchen Fällen besonders nützlich, da dann die vorher beschriebenen Methoden versagen. Die Schaltung zeigt Fig. 106. *A* und *B* sind die Anfangspunkte des positiven und negativen Speisekabels in der Centrale. Der Schleifdraht oder die Widerstandsbrücke wird zwischen diese Punkte gelegt. Vom Schleifkontakt beziehungsweise vom Verbindungspunkt der Widerstände *a*, *b* geht es über das Galvanometer *G* zur Erde. Die Schleife wird gebildet aus dem positiven Kabel, den Lampen und dem negativen Kabel; die Lampen bilden also einen wesentlichen Bestandtheil der Schleife. Nennt man den Widerstand der Schleife vom Punkte *A* bis zum Fehler *x*, vom Punkte *B* bis zum Fehler *y*, so ist bei Gleichgewicht der Brücke:

[1]) Electrician, 30. Aug. 1895.

$$x = \frac{a}{a+b}\,(x+y).$$

Den Gesammtwiderstand der Schleife $x + y$ erhält man durch gleichzeitige Ablesungen des Voltmeters V und Ampèremeters C am Schaltbrett

$$x + y = \frac{V}{C}.$$

Daraus ergiebt sich für x:

$$x = \frac{V}{C}\,\frac{a}{a+b} \quad \text{(99a)}$$

und analog:

$$y = \frac{V}{C}\,\frac{b}{a+b} \quad \text{(99b)}$$

Nimmt man den kleineren dieser beiden Werthe und kennt man den Widerstand der Schleife pro m, so kann man den Abstand des Fehlers von der Centrale bestimmen. Für weitere Einzelheiten sei auf den citirten Artikel verwiesen.

Da die Stromstärke im Netz fortwährend schwankt und infolgedessen auch die zur Einstellung des Gleichgewichts erforderlichen Werthe a und b sich ändern, kann die Methode keine genauen Resultate liefern. Ausserdem kann auch bei den Ablesungen an den Schaltbrettinstrumenten kein hoher Grad von Genauigkeit erreicht werden, während doch der procentische Fehler in diesen Ablesungen sich in gleichem Maasse auf die Werthe von x und y überträgt. Indessen kann eine Messung nach dieser Methode, besonders bei geringer Belastung ausgeführt, zur Orientirung darüber dienen, ob der Fehler in den Speisekabeln oder in der Vertheilungsleitung liegt.

78. Auf Hochspannungsnetze sind gleichfalls die Schleifenmethoden anwendbar, wenn ein besonderes, den Zwecken der Fehlerbestimmung dienendes, Schaltbrett zur Verfügung steht. Die Konstruktion desselben wäre so einzurichten, dass die in Fig. 85 oder Fig. 86 angedeuteten Verbindungen durch einfache Schaltung herzustellen wären. Der Schleifkontakt auf dem Drahte $a\,b$ müsste mit einem gut isolirten Handgriff versehen, und auch im Uebrigen müssten selbstverständlich alle Vorsichtsmaassregeln gegen zufällige Berührung blanker, unter Spannung stehender Theile getroffen werden. Für die Messung auf der Strasse wäre allerdings von der Ausführung der

Methode (Schaltung nach Fig. 86) wegen der damit verbundenen Gefahr abzurathen.

79. Einen ungefähren Anhaltspunkt über die Lage eines Fehlers in einer Hochspannungsleitung kann man auch auf die folgende Weise erhalten: Wenn ein Punkt des Netzes Erdschluss hat durch einen Fehler, dessen Widerstand klein ist im Vergleich zu dem Fehlerwiderstand des übrigen Netzes, so hat er gegen Erde das Potential Null. Fig. 107 stellt einen solchen Fall dar. Die Figur zeigt eine Vertheilungsleitung, welche den an verschiedenen Punkten in die Leitung eingeschalteten Transformatoren Strom zuführt. Die den Punkten *P* beigefügten Zahlen geben die absoluten Werthe der Potentiale in diesen Punkten gegen Erde an. Wenn man nun ein

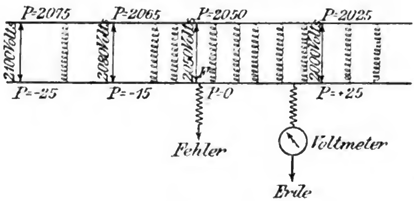


Fig. 107.

Voltmeter oder ein Galvanometer, dessen Widerstand hoch ist gegen den des Fehlers, nach einander zwischen die verschiedenen Punkte der fehlerhaften Leitung und Erde schaltet, so wird es einen um so niedrigeren Ausschlag geben, um so mehr man sich dem Fehler nähert. Der niedrigste Ausschlag wird an der Fehlerstelle selbst erreicht werden; darüber hinaus nehmen die Ausschläge das entgegengesetzte Vorzeichen an. Das Instrument muss einen hohen Widerstand besitzen, erstens deshalb, damit der Strom eine gewisse Stärke nicht überschreiten kann, zweitens weil bei Schwankungen des Fehlerwiderstandes während des Transportes des Instrumentes von einer Stelle zu einer anderen der Gesammtwiderstand des Stromkreises Fehler, Galvanometer, Erde nur möglichst geringe Aenderungen erfahren darf. Allerdings können ja schon durch die fortwährenden Stromschwankungen wegen des Ein- und Ausschaltens von Lampen in den Sekundärkreisen der Transformatoren die Ablesungen in verkehrtem Sinne beeinflusst werden, doch ist das Minimum in

der Fehlerstelle in der Regel ein so scharf ausgeprägtes, dass es mit Sicherheit zu erkennen ist. Das Instrument sowohl wie die Verbindungsdrähte müssen natürlich sorgfältig gegen Hochspannung isolirt werden, und jede Berührung der Leitung ist zu vermeiden. Denn wenn auch die Spannung an der fehlerhaften Leitung selbst nur niedrig ist, so kann dieselbe doch durch momentanes Latentwerden des Fehlers oder durch Ausbruch eines zweiten Fehlers in der anderen Leitung unvermuthet anwachsen. Um sich zu versichern, dass man das Instrument an die richtige Leitung angelegt hat, kann man eine Vakuumröhre gegen dieselbe halten. Die auf hoher Spannung befindliche Leitung bringt dieselbe zum Leuchten, die gesuchte Leitung nicht.

80. Bogenlampen-Serienstromkreise. Angenommen man habe einen Stromkreis von 20 hintereinandergeschalteten Lampen bei einer Spannung von 1000 Volt. Dann kommt auf jede Lampe nebst ihren Anschlusskabeln eine Spannung von 50 Volt und von Lampe zu Lampe findet ein Spannungsabfall von 50 Volt statt. In Fig. 108 würde also, wenn wir zunächst einmal von dem Vorhandensein eines Fehlers absehen, die Potentialdifferenz zwischen dem positiven Pol und der Lampe 3 150 Volt, die zwischen demselben Pol und Lampe 19 950 Volt betragen. Sind alle Theile eines Stromkreises, der Maschine und des Schaltbrettes gleich gut isolirt, so herrschen, wenn die Potentialdifferenz zwischen den Polen V Volt ist, zwischen positivem resp. negativem Pol und Erde die Spannungen $+\frac{V}{2}$ resp. $-\frac{V}{2}$. In unserem Falle betragen also die Potentiale gegen Erde an den Schaltbrettschienen unter der angenommenen Voraussetzung + 500 Volt und — 500 Volt. Liegt dagegen an der Lampe 3 ein Fehler, so ist an diesem Punkte das Potential Null, die positive Schiene hat das Potential + 150 Volt, die negative — 850 Volt.

Wir wollen diese einfachen Beziehungen durch eine Formel algebraisch ausdrücken, die uns den Ort des Fehlers aus einer Messung berechnen lässt. Ist V die Potentialdifferenz zwischen den Schaltbrettschienen, n die Zahl der Lampen und v der Spannungsabfall pro Lampe, so ist

$$v = \frac{V}{n}. \qquad \qquad (100)$$

Ist V' das Potential des positiven Pols, V'' das des negativen Pols, so ist, wenn man die Zählung der Lampen von 0 bis n am positiven Pol beginnt, die Nummer der fehlerhaften Lampe f:

$$f = \frac{V'}{v} = \frac{V - V''}{v} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (101)$$

Setzt man für v seinen Werth aus (100) ein, so erhält man:

$$f = n \frac{V'}{V}, \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (101\,a)$$

oder wenn man die Messung am negativen Pole vornimmt:

$$f = n \left(1 - \frac{V''}{V}\right). \quad \ldots \ldots \ldots \quad (101\,b)$$

wo jedoch f wiederum vom positiven Pol aus gezählt ist.

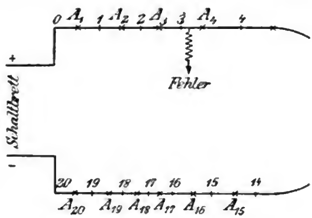


Fig. 108.

Handelt es sich um Wechselstromnetze, so muss man die Zählung der Lampen von einem bestimmten, vorher festzusetzenden Ende aus beginnen.

Die Potentiale V' oder V'' misst man mit einem Voltmeter von hohem Widerstande oder mit einem statischen Voltmeter. Eine Klemme desselben wird an Erde gelegt, die andere mit dem betreffenden Kabelende verbunden. Der Anschluss des Voltmeters muss natürlich hinter dem Regulirwiderstande am Schaltbrett erfolgen.

In der Londonderry-Centrale wird diese Methode in Verbindung mit einem elektrostatischen Voltmeter nach Thomson benutzt. Der Spannungsabfall pro Lampe beträgt 50 Volt, und jeder Stromkreis enthält 50 Lampen, so dass die normale Spannung der Schaltbrettschienen gegen Erde + 1250 und — 1250 Volt beträgt. Die Empfindlichkeit des Voltmeters ist so geregelt, dass ein Ausschlag von

1 Skalentheil einer Spannung von 50 Volt entspricht. Die normale Ablesung ist demnach 25. Tritt ein anderer Ausschlag auf, so giebt derselbe direkt die Nummer der fehlerhaften Lampe an, da in Gl. (100) $v = 1$ zu setzen ist.

Ein Fehler in der mittleren Lampe übt auf den normalen Ausschlag des Voltmeters keinen Einfluss aus, ist also nach der angegebenen Methode nicht zu erkennen. Aus diesem Grunde erscheint es erforderlich, auch den Isolationswiderstsnd von Serienstromkreisen nach einer der in dem Kapitel über Isolationsmessungen während des Betriebes beschriebenen Methoden von Zeit zu Zeit zu kontrolliren.

Hat man konstatirt, dass der Fehler nicht in einer Lampe selbst, sondern in der Verbindungsleitung zweier Lampen liegt, so findet man den Ort desselben in dieser Leitung auf folgende Weise: Man

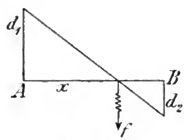


Fig. 109.

schaltet nacheinander zwischen jedes Ende des fehlerhaften Stückes und Erde ein Galvanometer ein. Ist d_1 der Ausschlag des Instruments, wenn es zwischen Punkt A und Erde liegt (Fig. 109), d_2 der Ausschlag zwischen Punkt B und Erde, l die Länge des Stückes $A\,B$, so ist der Abstand des Fehlers vom Punkte A

$$x = l \frac{d_1}{d_1 + d_2}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (102)$$

wo unter $d_1 + d_2$ die Summe der absoluten Werthe der Ausschläge zu verstehen ist.

Formel (102) beruht auf der Voraussetzung, dass die Ausschläge des Galvanometers proportional der Stromstärke sind, und dass längs der Leitung $A\,B$ ein gleichmässiger Spannungsabfall stattfindet.

Der Widerstand des Galvanometers für diese Messung, deren Genauigkeit wesentlich von der Konstanz der Stromstärke im Kreise abhängt, muss so hoch sein, dass Schwankungen des Fehlerwiderstandes die Ablesungen nicht beeinflussen können. Grosse Empfindlichkeit ist nicht erforderlich.

81. Um an Serienstromkreisen Fehlerbestimmungen nach der Schleifenmethode auszuführen, bedient man sich zweckmässig folgender Anordnung: Man schaltet so viel gleich grosse Glühlampen hintereinander, wie die Zahl der Bogenlampen in dem Serienstromkreis beträgt. Dieser Lampenwiderstand (Fig. 110) dient als Ersatz für den Schleifdraht und wird zwischen die Enden des Serienstrom-

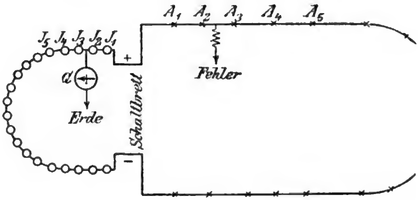


Fig. 110.

kreises geschaltet. Das Galvanometer G ist einpolig geerdet, mit der anderen Klemme desselben verbindet man nacheinander die verschiedenen Punkte des Glühlampenwiderstandes, bis der Ausschlag des Instrumentes ein Minimum geworden ist. Dieser Punkt entspricht dann auch der Lage des Fehlers im Aussenstromkreis.

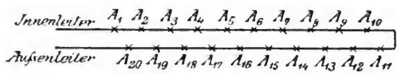


Fig. 111.

Findet man z. B. den kleinsten Ausschlag zwischen J_2 und J_3, so liegt der Fehler im Aussenkreise zwischen A_2 und A_3.

Die nähere Bestimmung des Fehlerortes in dem Verbindungskabel 2, 3 wird, wie oben auseinandergesetzt, durch Anlegen eines Galvanometers an die Punkte 2 und 3 vorgenommen.

Um die Figuren übersichtlicher zu machen, sind dieselben sämmtlich so gezeichnet, als ob die Lampen in dem Stromkreis über Hin- und Rückleitung gleichmässig vertheilt wären. In Wirklichkeit sind fast immer sämmtliche Lampen in das eine Kabel eingeschaltet, und das Stück von A_1 bis zur Centrale resp. von A_{20} bis zur Centrale

bildet die ganze Rückleitung. Bei Verwendung koncentrischer Kabel schaltete man früher wegen der bequemeren Montage sämmtliche Lampen in den äusseren Leiter und benutzte den inneren als Rückleitung. Neuerdings verfährt man meist umgekehrt. Schliesslich nutzt man auch beide Leiter gleichmässig aus und schaltet die Lampen, wie es Fig. 111 zeigt, abwechselnd in den äusseren und inneren Leiter. An der Hand des Schaltungsschemas ist dann aus der Fehlerbestimmung unmittelbar zu ersehen, ob der Fehler im inneren oder äusseren Leiter liegt.

Glühlampen-Serienstromkreise werden genau so behandelt wie Bogenlampenkreise.

Sechstes Kapitel.

Automatische Fehlermeldeapparate.

82. Die Methoden zur automatischen Anzeige von Fehlern im Netz bedienen sich der Prüfdrähte. Jedes Kabel ist mit einem isolirten Prüfdraht versehen, der gewöhnlich mit der Kabellitze direkt verseilt ist. Indem man nun auf irgend eine Weise eine beliebig grosse Spannungsdifferenz zwischen Kabel und Prüfdraht herstellt, zeigen in der Centrale aufgestellte, mit den Prüfdrähten in geeigneter Weise verbundene Signalapparate automatisch nicht nur das Vorhandensein eines Fehlers, sondern innerhalb gewisser Grenzen auch seinen Ort an. Dabei wird die Benutzung der Prüfdrähte zur Spannungsmessung in keiner Weise beeinträchtigt. Die Anwendung der Prüfdrähte zur Fehlermeldung ist zuerst von den Herren Agthe und Dr. Kallmann vorgeschlagen worden und leistet in dem ausgedehnten Vertheilungsnetz der Berliner Elektricitätswerke vortreffliche Dienste.

Das Princip der ursprünglichen Agthe'schen Methode, die für alle Niederspannungsnetze benutzt werden kann, ist das folgende:

In Fig. 112 sind I und II die negative und positive Sammelschiene, $-A$, $+A$, $-B$, $+B$ zwei Paare von Kabeln. Jedes Kabelpaar möge je einen Distrikt mit Strom versorgen; $-a$, $+a$, $-b$, $+b$ sind die Prüfdrähte, von denen je einer jedem Kabel zugetheilt ist. Angenommen nun der neben dem positiven Kabel laufende Prüfdraht sei mit der negativen Sammelschiene verbunden und umgekehrt, so dass sich Prüfdraht und Kabel stets auf entgegengesetztem Potential befinden. In die Prüfdrahtleitungen sind Signalapparate J_1 bis J_4 eingeschaltet, die in der Hauptsache aus einem Relais mit sehr hohem Widerstande bestehen.

Nun möge in dem Kabel + A ein Fehler ausbrechen. Durch den sich bildenden Lichtbogen oder die Wirkungen des Erdschlussstromes wird die Isolation des Prüfdrahtes sehr bald zerstört, und der Prüfdraht — a erhält Kontakt mit dem Kabel + A. Auf diese Weise kommt ein geschlossener Stromkreis zu Stande von der positiven Sammelschiene über + A zur Fehlerstelle und von dort zurück durch — a und den Signalapparat J_1 zur negativen Sammelschiene. Die im Prüfdraht fliessende Stromstärke erregt das Relais J_1, bringt eine Klappe zum Fallen und meldet auf diese Weise automatisch das Vorhandensein eines Fehlers in der positiven Hälfte desjenigen Netzdistriktes, den die Kabel A mit Strom versorgen.

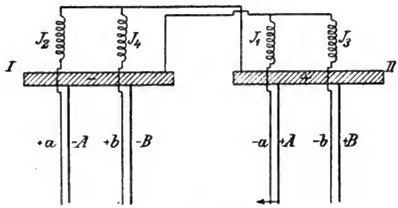


Fig. 112.

Die gleichzeitige Benutzung der Prüfdrähte zur Spannungsmessung an den Speisepunkten macht es erforderlich, in Wirklichkeit eine etwas andere Schaltung zu treffen. Diese ist in Fig. 114 skizzirt. Es findet nämlich die Verbindung der Prüfdrähte mit dem Kabel entgegengesetzter Polarität nicht an den Sammelschienen der Centrale, sondern an den Polplatten der Kabelkästen in den Speisepunkten statt. Ausserdem ist hier in die Prüfdrahtleitung je eine Abschmelzsicherung eingeschaltet. Die Enden der Prüfdrähte am Schaltbrett werden über die Signalapparate J_1, J_2 zu den Prüfdrahtsammelschienen — T_1, + T_1 geführt, zwischen denen das zur Messung der mittleren Spannung an den Speisepunkten dienende Voltmeter V_1 liegt.

83. Wir wollen nun zunächst etwas näher auf die Konstruktion der Signalapparate oder Relais eingehen und dann die Wirksamkeit der ganzen Anordnung erläutern.

Fig. 113 giebt eine schematische Skizze des Relais-Stromkreises. Da das Relais von der vollen Netzspannung erregt wird, so ist entweder der Eigenwiderstand der Spule C so gross zu machen,

dass ihre Erwärmung innerhalb mässiger Grenzen gehalten wird, oder aber man muss dem Relais einen hinreichenden Widerstand vorschalten. Die letztere Anordnung hat neben der Möglichkeit, die Spule weniger voluminös zu gestalten, den Vortheil, dass die Selbstinduktion des Apparates beträchtlich verringert werden kann, indem man den Vorschaltwiderstand induktionsfrei wickelt. Auf diese Weise erreicht man, dass bei der Unterbrechung des Relais-Stromkreises,

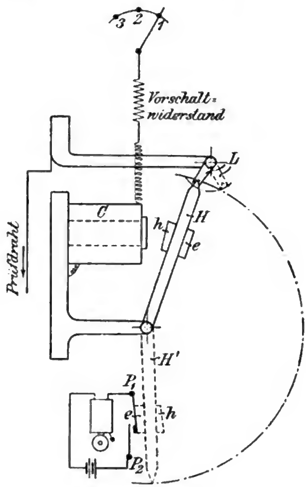


Fig. 113.

die durch den Apparat automatisch hergestellt wird, geringere Funkenbildung auftritt, als wenn der ganze Draht auf den Elektromagnetkern aufgewickelt wäre. Der Prüfdraht ist mittels der Hebel L und H an die Spule angeschlossen. Durchfliesst nun ein Strom die Windungen von C, so wird der an dem Hebel H befindliche Anker h von dem Eisenkern der Spule angezogen, und der Hebel L fällt zurück. Dadurch ist aber der Stromkreis unterbrochen, und der Hebel H schlägt in die Lage H' um. An H ist ein kleiner Hartgummihammer e befestigt, der in der Lage H' des Hebels gegen den Klingelkontakt P_1 P_2 drückt und dadurch den Stromkreis der

Klingelbatterie schliesst. Eine mit H verbundene nummerirte Klappe dient zur Bezeichnung der den einzelnen Distrikten angehörigen Relais, so dass durch das Klingelsignal in Verbindung mit dem Fallen der Klappe nicht nur das Vorhandensein eines Fehlers überhaupt angezeigt wird, sondern auch der Netzdistrikt, in welchem der Fehler gesucht werden muss, festgelegt ist. Die Schaltung des Klingel-Stromkreises ist aus Fig. 113 ebenfalls zu ersehen. Als Batterie dienen einige Leclanché-Elemente. Man kommt für alle Relais mit nur einem Klingelstromkreis aus, indem man die Läutetaste jedes einzelnen Relais mit den Punkten P_1, P_2 verbindet.

84. Wenden wir uns nunmehr zu Fig. 114. Unter normalen Verhältnissen ist jeder Speisepunkt durch seinen Prüfdraht über das Relais und den Umschalter S, dessen gewöhnliche Stellung auf dem mit 1 bezeichneten Kontakte liegt, mit der entsprechenden Prüfdrahtsammelschiene verbunden. Die an den positiven Sammelschienen zusammenlaufenden Prüfdrähte liegen neben dem negativen Kabel und umgekehrt. Auf diese Weise zeigt das Voltmeter V_1 die mittlere Spannung sämmtlicher Speisepunkte an. Das ist diejenige Spannung, nach deren Werth die Netzspannung stets einzureguliren ist. Es ist zu bemerken, dass durch die Hintereinanderschaltung der Relais mit dem Voltmeter in den Kreis des letzteren Instrumentes ein beträchtlicher Zusatzwiderstand hineinkommt, dessen Einfluss auf die Angaben des Instruments bei der Aichung zu berücksichtigen ist. Zum Zwecke der einwandsfreien Möglichkeit der Spannungsmessung ist auch sämmtlichen Relaisspulen der gleiche Widerstand zu geben. Da dieser gross ist im Vergleich mit den Widerständen der Prüfdrähte, so können die in Folge der verschiedenen Längen dieser letzteren sich ergebenden kleinen Widerstandsunterschiede die Voltmeterangaben kaum beeinflussen. Uebrigens sind auch diese geringen Differenzen durch passende Abgleichung der Relais-Vorschaltwiderstände unschwer auszugleichen.

Gesetzt nun es trete in dem Kabel $+A$ ein Fehler auf. Dadurch wird die Isolation des Prüfdrahtes zerstört, und es tritt nach einiger Zeit, oft allerdings erst nach Tagen, Wochen oder Monaten, indessen bevor das Kabel ernstlich beschädigt ist, Kontakt zwischen Prüfdraht und Kabel ein. Auf diese Weise ist ein Kurzschluss hergestellt von der positiven Sammelschiene durch A zur Fehlerstelle, von dort durch den Prüfdraht $-a$ zur negativen Polplatte und durch $-A$ zur negativen Sammelschiene. Der starke Kurzschlussstrom bringt

augenblicklich die Prüfdrahtsicherung *d*, mittels welcher der Prüfdraht — *a* im Kabelkasten an die negative Polplatte angeschlossen ist, zum Abschmelzen. Nunmehr nimmt der Strom folgenden Verlauf. Von der positiven Sammelschiene durch + *A* zum Fehler, von dort zurück durch — *a* und das Relais J_1 zur negativen Prüfdrahtsammelschiene. Hier verzweigt er sich in die übrigen dort angeschlossenen Relais J_3, J_5 . . . und geht schliesslich durch die entsprechenden Prüfdrähte — die er in Parallelschaltung durchfliesst — zu den negativen Polplatten und zur negativen Sammelschiene. J_1 ist in diesem

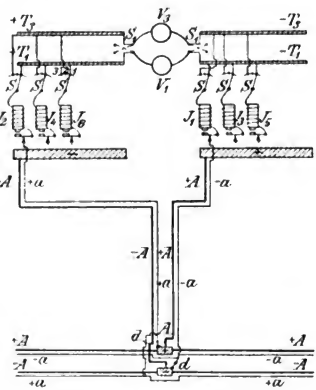


Fig. 114.

Falle das einzige Relais, das die volle Stromstärke erhält. Dasselbe tritt daher, wie vorher erläutert, in Thätigkeit, der Prüfdrahtstromkreis wird automatisch unterbrochen, und die Signalglocke ertönt. Die Abschaltung des den Fehler meldenden Prüfdrahtes ist aus zwei Gründen erwünscht. Erstens könnte die andauernde Wirkung des Stromes die Relaisspule beschädigen, zweitens aber — und das ist der Hauptzweck der Einrichtung — zeigt, so lange der mit dem positiven Kabel leitend zusammenhängende Prüfdraht an die negative Prüfdrahtsammelschiene angeschlossen ist, das Voltmeter V_1 falsche Werthe der Spannung an.

Ist durch das Fallen einer Signalklappe das Vorhandensein eines Fehlers gemeldet, so legt man zunächst den Hebel *H* wieder nach

oben. Bleibt er dann in seiner Lage, so war der Fehler nur vorübergehend. Tritt jedoch das Relais von neuem in Thätigkeit, so weiss man, dass ein dauernder Fehler im Netz ausgebrochen ist. In diesem Falle stellt man den Umschalter S auf Kontakt 2 ein. Man schaltet dadurch den Prüfdraht von der Prüfdrahtsammelschiene gänzlich ab und kann den Hebel behufs Abstellung des Klingelsignals dauernd in die Lage H zurückbringen.

Durch Anwendung der Umschalter S wird es auch möglich, die Spannung eines einzelnen Speisepunktes für sich zu messen. Diesen Zweck erreicht man, indem man alle Prüfdrähte ausser dem die Spannung des in Frage kommenden Speisepunktes übertragenden Paare von den Prüfdrahtsammelschienen abschaltet. Zur bequemen Ausführung dieser Schaltung ist ein zweites Paar von Prüfdrahtsammelschienen vorhanden, $+ T_3$, $- T_3$, zwischen denen das Voltmeter V_3 liegt. Die Kontakte 3 der Umschalter S sind sämmtlich mit diesen Sammelschienen verbunden. Stellt man also die zu den beiden in Betracht kommenden Prüfdrähten gehörenden Schalter auf den Kontakt 3, so sind diese beiden Prüfdrähte allein an V_3 angeschlossen, und das Voltmeter zeigt die Spannung an dem entsprechenden Speisepunkte an. Zwei weitere Umschalter S_1, S_1 dienen dazu, die Voltmeter V_1 und V_3 mit einander zu vertauschen, um eventuelle Ungleichheiten in den Angaben beider Instrumente zu eliminiren.

Bisher war angenommen, dass das Vertheilungsnetz in von einander unabhängige Abschnitte getheilt ist, deren jeder von einem besonderen Feederpaar gespeist wird. Das ist indessen nicht nothwendig der Fall. Das Vertheilungsnetz kann auch in sich geschlossen sein, wie es zumeist bei Niederspannungsnetzen der Fall ist. Dann wird die gesammte Fläche des Netzplanes willkürlich in so viele Unterbezirke eingetheilt, wie Speisepunkte vorhanden sind. Jeder Rayon wird von einem Feederpaar versorgt, und der Speisepunkt befindet sich in der Mitte des Distrikts. In jedem Bezirk werden nun die Prüfdrähte jeder Polarität unter einander verbunden. An dem Speisepunkt ist die positive Prüfdrahtleitung mittels einer Abschmelzsicherung an die negative Polplatte angeschlossen und umgekehrt. An den Grenzen der Distrikte enden die Prüfdrähte blind, d. h. die Drähte sind dort abgeschnitten und die Enden abisolirt. Die Kabel selbst gehen natürlich unabhängig davon weiter. Die Grenzen des Bezirks existiren nur auf der Karte und in dem Prüf-

drahtnetz. Wenn das Netz nur wenige Speisepunkte besitzt, so dass man eine geringe Anzahl weit ausgedehnter Bezirke erhalten würde, so kann man diese Bezirke wieder in Unterbezirke eintheilen, indem man irgend welche wichtigen Verzweigungspunkte zu Bezirksmittelpunkten macht. Dann müssen natürlich besondere Prüfdrahtleitungen von den Prüfdrahtsammelschienen der Centrale, unter Einschaltung von Signalrelais und Umschalter, zu diesen Punkten hingeführt werden, und diese Drähte müssen an den Verzweigungspunkten ebenso wie sonst in den Speisepunkten mittels Schmelzsicherungen an die Platten entgegengesetzter Polarität angeschlossen werden. In genau der gleichen Weise wie für Zweileiteranlagen ist das Schema der Schaltung auch in Dreileiternetzen mit geerdetem Mittelleiter zu treffen. Der Mittelleiter in solchen Netzen bedarf eines Prüfdrahtes nicht, dem positiven Aussenleiter ist der negative Prüfdraht beigegeben und umgekehrt.

Das beschriebene System der Fehlermeldung ist in dem ausgedehnten Netz der Berliner Elektricitätswerke in Betrieb und funktionirt ausgezeichnet. In Berlin versorgt nach den Angaben von Dr. Kallmann ein Prüfdrahtpaar eine Fläche von 245×245 m = 60 000 qm und hat eine Kabellänge von 2000 m zu überwachen. Dabei sind bei Ausbrechen eines Fehlers im höchsten Falle drei Vertheilungskästen zu öffnen.

Um die Zu- und Abschaltung von Prüfdrähten in den Vertheilungskästen bequem vornehmen zu können, gehört zu jeder Polplatte eine Prüfdrahtklemme; an diese werden sämmtliche Prüfdrähte einer Polarität angeschlossen, während die Prüfdrahtklemme dann ihrerseits über die Prüfdrahtsicherung mit der entgegengesetzten Polplatte verbunden ist.

Agthe's System der Fehlermeldung kann auch dazu dienen, das Eindringen von Schmutzwasser in die Kabelkästen anzuzeigen und der Entstehung von Kurzschlüssen auf diese Weise vorzubeugen. Zu diesem Zwecke sind mit den Prüfdrahtsammelschienen der Aussenleiter sowie mit der neutralen Polplatte sogenannte Stromschlussplatten verbunden, die bis nahe auf den Boden der Kabelkästen herabhängen. Wird nun durch eingedrungenes Wasser eine leitende Verbindung zwischen zweien dieser Platten hergestellt, etwa zwischen der negativen und positiven, so fliesst ein Strom von der positiven Prüfdrahtsammelschiene durch den positiven Prüfdraht über die Erdschlussstelle in den negativen Prüfdraht und zur negativen Prüf-

drahtsammelschiene. Durch diesen Strom kommen also beide Prüfdrahtsicherungen zum Abschmelzen.

Das Aufsuchen eines durch den Signalapparat gemeldeten Fehlers gestaltet sich folgendermassen: Da jeder Zuleitungspunkt zwei Signalklappen hat, eine für den positiven, eine für den negativen Prüfdraht, so übersieht der aufsichtführende Beamte sofort, um welchen

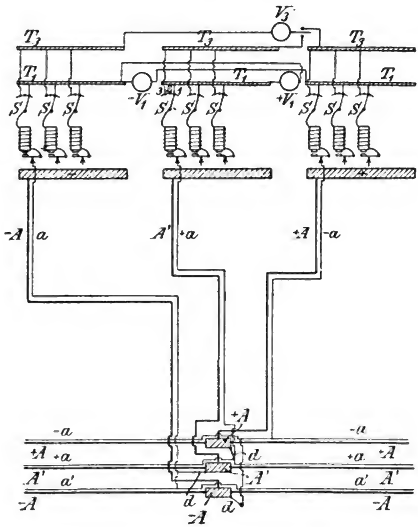


Fig. 115.

Netzstrang es sich handelt. Zunächst wird nun an dem vom Relais angezeigten Speisepunkt der Kasten geöffnet, die einzelnen Prüfdrähte von der Prüfdrahtklemme gelöst und zwischen jeden Prüfdraht und den Nullleiter ein Voltmeter oder eine Glühlampe gehalten. Wird der fehlerhafte Prüfdraht berührt, so erglüht die Lampe resp. das Voltmeter zeigt Spannung.

Erweisen sich in dem zuerst geöffneten Kasten alle Prüfdrähte intakt, so schreitet man zu dem nächsten Kasten des Bezirks fort

und verfährt dort in der gleichen Weise, bis man den fehlerhaften Prüfdraht aufgefunden hat.

Für Dreileiternetze mit nicht geerdetem Mittelleiter gestaltet sich die Anordnung folgendermaassen: Der im negativen Kabel liegende Prüfdraht wird an den Speisepunkten über die Prüfdrahtsicherung mit dem Mittelleiter verbunden, der Prüfdraht im Mittelleiter mit der Polplatte des positiven Leiters und der Prüfdraht des positiven Leiters mit dem negativen Kabel. Auf diese Weise herrscht zwischen dem negativen Leiter und seinem Prüfdraht sowie dem Mittelleiter und dem seinigen die einfache Betriebsspannung, während der positive Leiter gegen seinen Prüfdraht die doppelte Betriebsspannung führt. Aus Fig. 115, die das Schaltungsschema für den angenommenen Fall darstellt, ersieht man, dass drei Relaisgruppen vorhanden sind, von denen je eine jeder Polarität entspricht. Die Voltmeter $+V_1$ und $-V_1$ messen die mittlere an den Speisepunkten herrschende Spannung zwischen positivem resp. negativem und neutralem Leiter. Stellt man irgend drei zu einander gehörende Umschalter S auf die Kontaktstücke 3 ein, so ist der Speisepunkt, dessen Prüfdrahtleitungen zu diesen Umschaltern hinführen, an die Prüfdrahtschienen T_3', $+T_3$, $-T_3$ angeschlossen, und die Einzelspannungen an diesem Speisepunkte können mittels des auf die positive und negative Schiene umschaltbaren Voltmeters 3 gemessen werden.

85. Vielfach ist man in neueren Anlagen nach dem Dreileitersystem dazu übergegangen, eine Betriebsspannung von 2×220 Volt anzuwenden, so dass bei der Uebertragung der im vorigen Abschnitt beschriebenen Schaltung auch auf solche Anlagen ständig eine Spannungsdifferenz von 440 Volt zwischen Prüfdraht und Kabel bestehen würde. Eine solche Spannung könnte aber auf die Dauer die Isolation des Prüfdrahtes gefährden. Die Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft hat daher neuerdings für solche Anlagen eine Schaltung eingeführt, bei der einerseits die ständige Spannungsdifferenz zwischen Kabel und Prüfdraht in normalem Zustande nur 110 Volt beträgt, während anderseits zugleich auch die Möglichkeit, durch Erdplatten das Eindringen von Wasser in die Kabelkästen anzuzeigen, gewahrt bleibt[1]).

[1]) Anm.: Die Angaben über die nachstehend beschriebene Schaltung wurden dem Herausgeber von der Allgemeinen Elektricitäts-Gesellschaft in dankenswerther Weise zur Verfügung gestellt.

Die getroffene Anordnung ist in Fig. 116 skizzirt. E, E sind die Platten, die beim Eindringen von Wasser in die Kästen den Kontakt zwischen Prüfdraht und Erde herstellen sollen. Die Herabsetzung der Spannung zwischen Kabel und Prüfdraht ist dadurch erreicht, dass letzterer nicht direkt an das Kabel entgegengesetzter Polarität resp. an den Mittelleiter angeschlossen ist, sondern von der Mitte eines Widerstandes abzweigt, welcher zwischen Kabel und Nullleiter geschaltet wird. Dieser Widerstand ist in Fig. 116 durch $A_1 + A_2$ bezeichnet; je ein Widerstand befindet sich zwischen Nullleiter und positiver sowie zwischen ersterem und negativer Schiene.

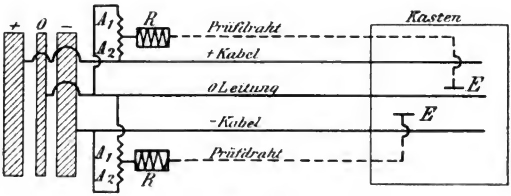


Fig. 116.

Der Prüfdraht ist über das Relais R zwischen A_1 und A_2 eingeschaltet. Wählt man $A_1 = A_2$, so ist bei normalem Betriebe, falls die Netzspannung 2 × 220 Volt beträgt, sowohl zwischen Prüfdraht und Kabel als auch zwischen Prüfdraht und Erde eine Spannungsdifferenz von nur 110 Volt vorhanden. Das Relais wird in diesem Falle stromlos sein.

Tritt nun ein Isolationsfehler zwischen Kabel und Prüfdraht auf, so schliesst sich der Stromkreis durch den Widerstand A_1 und das Relais, die Klappe des Relais fällt und giebt in der üblichen Weise das Alarmsignal. Erhält dagegen der Prüfdraht durch in den Kabelkasten eingedrungenes Wasser Erdschluss, so wird der Stromschluss durch den Widerstand A_2 und das Relais hergestellt; auch in diesem Falle ertönt das Alarmsignal.

Wendet man als Widerstände A_1, A_2 zwei Glühlampen von je 220 Volt an, so sieht man in der Centrale, wenn das Alarmsignal ertönt, daraus, dass A_1 oder A_2 leuchtet, zugleich ob es sich um die Beschädigung eines Kabels oder um Eindringen von Wasser in einen

Kabelkasten handelt. Bei normalem Betriebe brennen nämlich die beiden hintereinander geschalteten Lampen mit halber Spannung, also dunkel. Entsteht aber ein Isolationsfehler zwischen Kabel und Prüfdraht, so wird die Lampe A_1 hell brennen, die Lampe A_2 erlöschen. Umgekehrt wird, wenn Wasser in einen Kasten eindringt, die Lampe A_1 erlöschen und A_2 wird mit normaler Helligkeit leuchten. So wird dadurch, dass man aus dem Erlöschen der einen oder der anderen Lampe sofort weiss, welcher Art der Fehler ist, die Ermittelung desselben bedeutend erleichtert.

Zu bemerken ist, dass allerdings auch bei dieser Schaltung die Möglichkeit nicht ausgeschlossen ist, dass eine Spannungsdifferenz von 220 Volt zwischen Kabel und Prüfdraht auftritt. Dies ist dann der Fall, wenn eine der Lampen A_1 oder A_2 ausgeschaltet wird oder durchbrennt. Indessen kann die Isolation des Prüfdrahtes einer solchen Spannungsdifferenz unbedenklich standhalten.

86. Dr. Kallmann hat gleichfalls zur Herabsetzung der zwischen Prüfdraht und Kabel herrschenden Spannungsdifferenz eine Modifikation der vorbeschriebenen Methode angegeben, bei der die Spannungsdifferenz nur wenige Volt beträgt. Es erscheint indessen im Interesse einer sicheren und möglichst frühzeitigen Fehlermeldung eher vortheilhaft als nachtheilig, eine nicht zu geringe Spannungsdifferenz zwischen Kabel und Prüfdraht herzustellen. In diesem Fall nämlich wird schon ein kleiner Fehler zu einer solchen Zerstörung der Isolation Veranlassung geben, dass ein Ansprechen der Signalapparate eintritt. Darin liegt aber gerade der Werth der Methode, dass sie möglichst unmittelbar nach der Entstehung den Fehler auch meldet und auf diese Weise länger dauernde Stromverluste in die Erde verhindert. Anderseits bietet es der Fabrikation in keiner Hinsicht eine Schwierigkeit, ein Kabel mit Prüfdraht so herzustellen, dass zwischen beiden Leitern eine Spannungsdifferenz von 220 Volt vertragen werden kann, ohne die Isolation des Prüfdrahtes zu gefährden. Zudem werden bereits in der Fabrik die Kabel zwischen Prüfdraht und Seele mit einer Spannungsdifferenz geprüft, welche die im Betriebe zwischen den beiden Leitern herrschende Spannung bedeutend übersteigt, so dass also eine hinreichende Betriebssicherheit auch dadurch gewährt ist. Die in Berlin verlegten Kabel sind mit imprägnirter Jute isolirt, mit einem nahtlosen Bleimantel umpresst und darüber mit Bandeisen armirt. Der gleichfalls mit Jute etwa 2 mm stark isolirte Prüfdraht von 1,0—1,5 qmm Querschnitt

wird mit der Kupferlitze des Kabels direkt verseilt. Da die Jute auch in imprägnirtem Zustande noch ziemlich stark hygroskopisch ist, so sind die offenen Enden der Kabel sorgfältig gegen Feuchtigkeit zu schützen. Zweckmässig ist es, dieselben mit Gummiband vollkommen dicht zu umwickeln. Die Unterlassung dieser Vorsichtsmaassregel kann unter Umständen die Isolationsfähigkeit der Kabel beträchtlich schädigen.

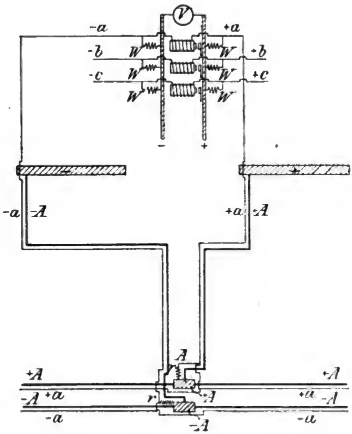


Fig. 117.

Kallmann's Methode, die zwischen Seele und Prüfdraht bestehende Spannungsdifferenz zu verringern, beruht auf folgendem Princip:

In den Kästen sind die Prüfdrähte an die Polplatten gleicher Polarität angeschlossen. Die Verbindung ist jedoch nicht direkt hergestellt, sondern unter Zwischenschaltung eines Widerstandes *r* von einigen 100 Ohm. Für jeden Speisepunkt ist ein Relais vorgesehen, das nach der Schaltung Fig. 117 zwischen den Prüfdrahtsammelschienen parallel zum Voltmeter liegt. Sein Widerstand beträgt mehrere 1000 Ohm. In die Prüfdrahtleitungen sind vor den Sammelschienen die Widerstände *w* zum Ausgleich der verschiedenen Widerstände der Prüfdrähte eingeschaltet. Die Empfindlichkeit der

Signalapparate ist so bemessen, dass unter den normalen Betriebsverhältnissen die verfügbare Stromstärke zu gering ist, um dieselben zu erregen. Sobald jedoch das Kabel einen Fehler bekommt und der Prüfdraht in Kontakt mit der Kabelseele geräth, ist der Widerstand r aus dem Stromkreis ausgeschaltet, das Relais wird von einem stärkeren Strome durchflossen und wird dadurch erregt.

Fig. 117 bezieht sich auf ein Zweileitersystem. Die Schaltung bleibt dieselbe für Dreileitersysteme mit geerdetem Mittelleiter.

87. Dr. Kallmann hat noch eine weitere Methode angegeben, die Prüfdrähte zur Fehlermeldung zu verwenden. Das Princip derselben besteht darin, das durch den Fehler bedingte Anwachsen des Erdpotentials an der Fehlerstelle zu vergleichen mit dem Potential einer in der Centrale befindlichen „Normalerde“. Isolirte Prüfdrähte werden an verschiedenen Punkten des Vertheilungsnetzes mit den Kabelkästen oder der Armatur verbunden oder auf eine andere Weise gut geerdet. In der Centrale führt jeder dieser Prüfdrähte zu einem Relais der schon beschriebenen Konstruktion, dessen anderes Ende geerdet ist. Wenn nun irgendwo im Netz ein Fehler ausbricht, so steigt das Potential in der ganzen Nachbarschaft der Fehlerstelle an. Daher wird das Potential des der Fehlerstelle zunächst liegenden Prüfdrahtes höher sein als das Potential der Normalerde; zwischen den Klemmen der Relais kommt eine Spannungsdifferenz zu Stande, ein Strom durchfliesst die Spule und bringt die Klappe zum Fallen. Dies Schaltungsschema ist in Fig. 118 dargestellt. Jeder Prüfdraht geht zunächst zu einer Kontaktplatte P, und diese ist erst mit der einen Relaisklemme verbunden. Sehr oft fallen nämlich mehrere Klappen zu gleicher Zeit. Dann prüft man mit dem Voltmeter V_1, zwischen welcher Kontaktplatte und Erde die grösste Spannungsdifferenz besteht. Eine Klemme des Voltmeters ist geerdet, während die andere an einer biegsamen Leitungsschnur einen Kontaktstift T trägt, den man rasch über die einzelnen Platten P hinüberstreichen lassen kann. Eine Widerstandsspule ist mit dem Voltmeter in Reihe geschaltet. Dieselbe ist in der Regel durch den Kurzschlussstöpsel S ausgeschaltet und soll die Empfindlichkeit des Instruments auf einen passenden Werth reduciren für den Fall, dass in Folge eines sehr intensiven Erdschlusses die Spannung einen aussergewöhnlich hohen Werth annimmt.

Ausser der angegebenen Art der Prüfdrahtführung kann man das Netz auch ebenso wie bei der anderen Methode in Distrikte

eintheilen. An den Grenzen dieser Distrikte ist dann, wenn die Erdung der Prüfdrähte durch Verbinden mit der Armatur geschieht, die Kontinuität derselben und des Bleimantels durch einen kleinen Zwischenraum zu unterbrechen. Dies muss nothwendig innerhalb der Kabelmuffen geschehen, weil sonst Feuchtigkeit in die Kabel eindringen würde.

Besteht das Netz aus blanken Leitern, so müssen parallel denselben Prüfdrähte gelegt werden. Dieselben sind dann in den Mittel-

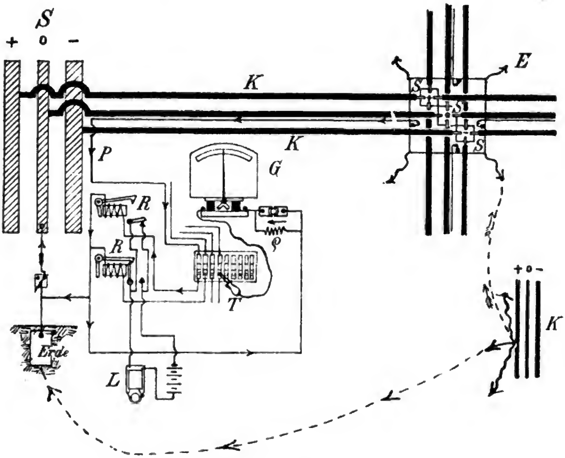


Fig. 118.

punkten der ihnen zugewiesenen Distrikte mit den Vertheilungskästen oder innerhalb der Häuser mit den Wasserleitungsrohren gut zu verbinden. Auf diese Weise erweist sich das System also auch brauchbar, um Fehler in Hausanschlüsssen zu melden.

In allen Städten oder Bezirken, in denen elektrische Strassenbahnen verkehren, kann die Methode der Fehlermeldung durch Messung des Erdpotentials natürlich ohne Weiteres nicht angewandt werden, da der aus den Schienen der Strassenbahn in die Erde entweichende Strom zu vielfachen falschen Alarmirungen Veran-

lassung geben würde. Derartige Störungen könnte man nur vermeiden, wenn man die Relais weniger empfindlich macht, wobei dann allerdings die ganze Methode an Werth einbüssen und unter Umständen ganz unbrauchbar werden könnte. In jedem Falle wird man zu der Einführung des Systems in einem von elektrischen Strassenbahnen befahrenen Bezirk nur nach gründlicher Untersuchung der elektrischen Eigenschaften des Erdbodens und der Vertheilung und Ausbreitung elektrischer Störungen in ihm schreiten dürfen.

Die Methode ist nicht auf Niederspannungsnetze beschränkt. Auch in Hochspannungsanlagen dürfte sie gute Dienste leisten. Als Signalapparate sind dann Wechselstromrelais zu benutzen, und als kleinste Erregerspannung ist ein beträchtlich höherer Werth festzusetzen wie bei Niederspannung.